

ANTÓNIO MARIA OLIVEIRA COELHO PALMA

**PRINCIPAIS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS
DE PAREDES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Perfil de Construção, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Lisboa, 2010

PRINCIPAIS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE ANOMALIAS DE PAREDES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Perfil de Construção, pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

António Maria Oliveira Coelho Palma

Orientador Científico: Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho (DEC-FCT/UNL)

Co-orientador Científico: Doutor Válder José da Guia Lúcio (DEC-FCT/UNL)

Junho de 2010

Agradecimentos

A presente dissertação foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

Em primeiro lugar queria expressar o meu sincero agradecimento a todos os que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, particularmente:

Ao Prof. Fernando Farinha da Silva Pinho, Professor Auxiliar do DEC-FCT, meu Orientador Científico, e ao Prof. Válder José da Guia Lúcio, Professor Associado do DEC-FCT, meu Co-orientador, pelo apoio, incentivo e orientação do trabalho realizado, bem como por todos os conselhos e ensinamentos transmitidos.

Ao Eng. Nuno Ferreira, Eng. André Martins, Eng. Bruno Silva, Arq. Rita Soares e ao Sr. Camilo da empresa EDIFER pelo auxílio e disponibilidade demonstrada nas diversas visitas à obra onde foi realizado o caso de estudo.

Ao Eng. Pedro Machaqueiro da BOLONIA TESTING INSTRUMENTS, Eng. Francisco Fernandes da TECNOWAVE e Eng. Luís Viegas Mendonça da SPYBUILDING pela disponibilidade na demonstração do ensaio de radar de prospecção geotécnica e pelo esclarecimento de algumas dúvidas relativas ao mesmo.

À Eng. Clara Pinto da MRA pela disponibilidade concedida e pelo empréstimo da câmara termográfica utilizada nos ensaios de termografia.

Ao Prof. Vasco Rato, do ISCTE e ao Prof. Daniel Aelenei, do DEC-FCT/UNL pelo esclarecimento de dúvidas relativas aos ensaios realizados.

Ao Sr. José Gaspar, do DEC-FCT/UNL, pelo acompanhamento e auxílio na execução dos ensaios relativos ao caso de estudo. À D. Maria da Luz, D. Carla Figueiredo e ao Sr. Jorge Silvério do DEC-FCT/UNL pela disponibilidade prestada.

Aos meus colegas Hugo Andrade e Hugo Lucas pela cedência de algumas fotografias.

À minha Mãe, ao meu Irmão, à restante família, à Carolina e a todos os meus amigos pelo apoio incondicional sempre demonstrados.

Principais Métodos de Diagnóstico de Anomalias de Paredes de Edifícios Antigos. Exemplos de Aplicação

Resumo

Os métodos de diagnóstico de anomalias são uma ferramenta essencial para a escolha das soluções a utilizar na reabilitação de construções antigas. Esta reabilitação, actualmente em expansão, tem diversas vantagens económicas, sociais, ambientais, históricas e culturais.

Uma das condições prévias a uma boa solução de reabilitação é, assim, a correcta identificação das soluções construtivas dos edifícios antigos, bem como das anomalias que apresentam, o que requer um adequado conhecimento dos meios de diagnóstico existentes e do seu campo de aplicação. Neste sentido, descrevem-se neste trabalho as principais soluções construtivas e as anomalias de edifícios antigos existentes no nosso país, as quais podem ser devidas a vários factores, nomeadamente assentamentos diferenciais de fundações, sismos, humidade, acção de sais solúveis e a natural degradação dos materiais, entre outros.

Sendo o principal objectivo deste trabalho a análise dos métodos de diagnóstico, efectua-se uma descrição e caracterização dos mais utilizados para a detecção de anomalias em paredes de edifícios antigos.

Para um correcto diagnóstico deve fazer-se um levantamento documental das características do edifício e outras informações relevantes. Na maior parte dos casos os trabalhos de diagnóstico iniciam-se com uma observação visual das anomalias, e de seguida uma análise *in situ* através de métodos preferencialmente não-destrutivos, embora por vezes seja necessário o recurso a métodos semi-destrutivos ou até destrutivos.

Neste trabalho aplicam-se ainda alguns ensaios de diagnóstico *in situ* e laboratoriais em diversas paredes de um edifício antigo localizado em Lisboa, como exemplos de aplicação dos métodos analisados.

Palavras-chave: Parede de edifício antigo, anomalia, diagnóstico

Main Diagnosis Methods of Anomalies of Ancient Building Walls'. Application Examples

Abstract

The diagnosis methods of anomalies are essential tools in the rehabilitation of ancient buildings, particularly in the planning and design stage. This rehabilitation, currently under expansion, has several economic, social, environmental, historical and cultural advantages.

One of the preconditions for a good solution of rehabilitation is thus to properly identify constructive building solutions, as well as their anomalies, which requires an adequate knowledge of the existing resources and its scope. Therefore, this thesis describes the main constructive solutions and anomalies of ancient buildings in Portugal. These anomalies may be due to several factors, including foundations differential settlement, earthquakes, humidity, the action of soluble salts and natural degradation of materials, among others.

The main purpose of this study is the analysis of the existing methods of diagnosis. Therefore a description and characterization of the most used to detect anomalies in the walls of ancient buildings is carried out.

To achieve a correct diagnosis, a documentary survey of the characteristics of the building and other relevant information should be made. In most cases, it begins with a visual observation of the anomalies followed by an analysis *in situ* by methods preferably non-destructive although, sometimes, it is necessary to resort to semi-destructive or even destructive methods.

In this written work, *in situ* and laboratory diagnosis tests were applied on several walls of an old building located in Lisbon, as examples of the analysed applications.

Keywords: Ancient building wall, anomaly, diagnosis

Simbologia

Siglas

DEC – Departamento de Engenharia Civil da FCT/UNL

EN – Norma Europeia (do inglês, *European Standard*)

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNL

GPR – Radar de Prospeção Geotécnica (do inglês, *Ground Penetration Radar*)

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

UNL – Universidade Nova de Lisboa

Notações escalares latinas

A – área da “pastilha” metálica

F_u – força de rotura

f_u – tensão de aderência

K_a – razão entre a área de contacto do macaco plano e a área da abertura

K_m – factor de calibração dos macacos planos

ℓ – distância entre dois pontos

m_{cc} – massa da amostra ao fim de 24 horas na câmara condicionada (no ambiente seleccionado)

$m_{húmida}$ – massa da amostra após a sua recolha na parede

m_{seca} – massa da amostra após secagem

p – pressão dos macacos planos

pH – potencial de hidrogénio iónico. Este índice indica se uma solução líquida é ácida, neutra ou básica

t – tempo que as ondas sónicas demoram a percorrer uma distância ℓ

Notações escalares gregas

v – velocidade das ondas ultra-sónicas

σ – tensão (relação entre força e área)

Índice do Texto

Capítulo 1 – Introdução

1.1 – Considerações Gerais.....	1
1.2 – Motivação e Objectivos.....	3
1.3 – Organização da Dissertação.....	3

Capítulo 2 – Soluções Construtivas de Fundações e Paredes de Edifícios Antigos

2.1 – Considerações gerais.....	5
2.2 – Fundações.....	5
2.3 – Paredes.....	7
2.3.1 – Paredes resistentes.....	7
2.3.2 – Paredes de compartimentação ou paredes divisórias.....	7
2.3.3 – Revestimentos.....	7
2.4 – Principais soluções construtivas de edifícios antigos.....	8
2.4.1 – Construções de terra.....	8
2.4.2 – Construções de alvenaria de tijolo.....	11
2.4.3 – Construções de alvenaria de pedra.....	12
2.4.4 – Construções de cantaria e enxilharia.....	15
2.4.5 – Construções mistas.....	16

Capítulo 3 – Anomalias em Fundações e Paredes de Edifícios Antigos

3.1 – Considerações gerais.....	19
3.2 – Anomalias em fundações.....	19
3.3 – Anomalias em paredes resistentes.....	20
3.3.1 – Fendilhação.....	20
3.3.2 – Desagregação.....	21
3.3.3 – Esmagamento.....	22
3.3.4 – Acção da água.....	22
3.3.5 – Oxidação de elementos metálicos.....	25
3.3.6 – Acção dos agentes biológicos em elementos de madeira.....	25
3.4 – Anomalias em paredes de compartimentação.....	26

3.5 – Anomalias em revestimentos de paredes exteriores e interiores.....	27
3.5.1 – Fendilhação.....	27
3.5.2 – Desagregação.....	27
3.5.3 – Esmagamento.....	28
3.5.4 – Acção dos agentes climáticos.....	28

Capítulo 4 – Métodos de Diagnóstico de Anomalias de Paredes de Edifícios Antigos

4.1 – Considerações gerais.....	29
4.2 – Observação preliminar.....	30
4.3 – Levantamento geométrico da construção.....	31
4.4 – Identificação do funcionamento estrutural do edifício. Ensaio dinâmico.....	32
4.5 – Identificação e monitorização das anomalias.....	33
4.6 – Definição dos ensaios a realizar.....	35
4.6.1 – Ensaio não-destrutivo.....	36
4.6.2 – Ensaio semi-destrutivo.....	43
4.6.3 – Ensaio destrutivo.....	53

Capítulo 5 – Exemplos de Aplicação

5.1 – Considerações gerais.....	57
5.2 – Caracterização do edifício objecto do estudo.....	57
5.3 – Ensaio de termografia.....	66
5.4 – Ensaio de ultra-sons.....	69
5.5 – Ensaio de determinação do teor de humidade.....	72
5.6 – Ensaio de determinação do teor de higroscopicidade.....	75
5.7 – Ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	77
5.7.1 – Primeira série do ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	79
5.7.2 – Segunda série do ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	83
5.8 – Síntese de resultados.....	86
5.9 – Análise e discussão dos resultados obtidos.....	89

Capítulo 6 – Comentários Finais e Conclusões. Desenvolvimentos Futuros

6.1 – Considerações gerais.....	97
6.2 – Comentários finais e conclusões.....	97
6.3 – Objectivos propostos e objectivos alcançados.....	99
6.4 – Desenvolvimentos futuros.....	100

Bibliografia.....	101
Anexo I – Modelo de boletim de ensaio.....	107
Anexo II – Boletim de ensaio de determinação do teor de humidade de uma parede.....	111
Anexo III – Boletim de ensaio de termografia.....	117

Índice de Figuras

Fig. 1.1 – Metodologia para a reabilitação estrutural.....	2
Fig. 2.1 – Representação esquemática de fundação directa.....	5
Fig. 2.2 – Representação esquemática de fundação indirecta, com estacas de madeira sob poços e arcos de alvenaria, característica dos edifícios da Baixa Pombalina.....	6
Fig. 2.3 – Construção em taipa.....	9
Fig. 2.4 – Ferrolhos metálicos para ligação das paredes de taipa.....	10
Fig. 2.5 – Construção em adobe.....	10
Fig. 2.6 – Alvenaria de tijolo maciço – Praça de touros do Campo Pequeno.....	11
Fig. 2.7 – Representação esquemática de diversas espessuras de paredes de alvenaria de tijolo.	11
Fig. 2.8 – Parede de alvenaria ordinária de um edifício pós-Pombalino.....	12
Fig. 2.9 – Reforço dos cunhais.....	13
Fig. 2.10 – Representação esquemática de reforço do vão de janela.....	13
Fig. 2.11 – Representação esquemática das diversas constituições das paredes de alvenaria de pedra.....	14
Fig. 2.12 – Construção em alvenaria de pedra seca.....	14
Fig. 2.13 – Paredes de cantaria – Mosteiro dos Jerónimos.....	15
Fig. 2.14 – Frontais com “Cruzes de Santo André”.....	16
Fig. 2.15 – Paredes de tabique.....	17
Fig. 2.16 – Edifício “gaioleiro”.....	18
Fig. 3.1 – Edifício antigo com ausência de manutenção.....	19
Fig. 3.2 – Fendilhação numa parede.....	20
Fig. 3.3 – Esquemas de fendilhação por assentamento diferencial da fundação.....	21
Fig. 3.4 – Desagregação da alvenaria.....	22
Fig. 3.5 – Pormenor do apoio das asnas numa parede.....	22
Fig. 3.6 – Degradação de parede pela acção da água.....	23
Fig. 3.7 – Representação esquemática da formação de eflorescências e criptoflorescências.....	23
Fig. 3.8 – Diagrama psicométrico.....	24
Fig. 3.9 – Oxidação e aumento de volume de ferrolho metálico.....	25
Fig. 3.10 – Degradação dos elementos de madeira numa parede.....	25

Fig. 3.11 – Esquemas de fendilhações mais frequentes e respectivas causas em paredes divisórias.....	26
Fig. 3.12 – Desprendimento do revestimento de azulejos.....	27
Fig. 3.13 – Desagregação do revestimento da parede.....	28
Fig. 4.1 – Alguns instrumentos para a observação preliminar.....	30
Fig. 4.2 – Fases do levantamento fotogramétrico.....	31
Fig. 4.3 – Equipamento para ensaios dinâmicos.....	32
Fig. 4.4 – Exemplo de resultados obtidos com os ensaios dinâmicos.....	32
Fig. 4.5 – Exemplo de levantamento de anomalias em paredes de edifício antigo.....	33
Fig. 4.6 – Fissurómetro aplicado numa parede.....	34
Fig. 4.7 – Testemunho em gesso.....	34
Fig. 4.8 – Poço de reconhecimento.....	35
Fig. 4.9 – Equipamento para o ensaio de termografia.....	37
Fig. 4.10 – Identificação de uma parede de tijolo sob o revestimento, através do ensaio de termografia.....	37
Fig. 4.11 – Equipamento para ensaio de ultra-sons.....	38
Fig. 4.12 – Representação esquemática dos métodos para o ensaio de ultra-sons.....	39
Fig. 4.13 – Tomografia sónica horizontal da secção de uma coluna de alvenaria antes e depois de uma injeção de consolidação.....	40
Fig. 4.14 – Exemplo de Radargrama.....	41
Fig. 4.15 – Equipamento de radar de prospecção geotécnica.....	41
Fig. 4.16 – Aquisição de dados no terreno com o GPR, em modo de reflexão.....	42
Fig. 4.17 – Representação esquemática de haste boroscópica.....	43
Fig. 4.18 – Inspeção com câmara boroscópica.....	44
Fig. 4.19 – Medição de humidade superficial de uma parede com humidímetro.....	44
Fig. 4.20 – Fases do ensaio de determinação do teor de humidade de uma parede.....	45
Fig. 4.21 – Tiras de medição de sais solúveis.....	47
Fig. 4.22 – Dinamómetro.....	49
Fig. 4.23 – Metodologia do ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	49
Fig. 4.24 – Representação esquemática dos tipos de rotura no ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	50
Fig. 4.25 – Representação esquemática de diversas configurações dos macacos planos.....	51
Fig. 4.26 – Representação esquemática das fases do ensaio com macacos planos simples.....	51
Fig. 4.27 – Ensaio com macacos planos duplos.....	51

Fig. 4.28 – Exemplo de diagramas de resultados do ensaio de macacos planos.....	52
Fig. 4.29 – Curva de calibração dos macacos planos.....	53
Fig. 4.30 – Carote de uma parede de alvenaria de pedra de 3 panos.....	54
Fig. 5.1 – Fachada nascente do Palacete Lusitânia.....	57
Fig. 5.2 – Alçados Nascente e Sul do Palacete Lusitânia.....	58
Fig. 5.3 – Plantas dos pisos -1 e 0 do Palacete Lusitânia.....	59
Fig. 5.4 – Soluções construtivas do Palacete Lusitânia.....	60
Fig. 5.5 – Algumas anomalias do Palacete Lusitânia.....	61
Fig. 5.6 – Plantas parciais do Palacete Lusitânia com a indicação das paredes “ensaiadas” e quais os ensaios efectuados em cada uma delas.....	62
Fig. 5.7 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da Parede 1.....	62
Fig. 5.8 – Planta parcial do piso -1 e imagem das vistas v1 e v4 da parede 2.....	63
Fig. 5.9 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da parede 3.....	64
Fig. 5.10 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da parede 4.....	64
Fig. 5.11 – Planta parcial do piso -1 e imagem das vistas v2 e v3 da parede 5.....	65
Fig. 5.12 – Planta parcial do piso 0 e imagem da vista v1 da parede 6.....	66
Fig. 5.13 – Câmara termográfica utilizada no ensaio de termografia.....	67
Fig. 5.14 – Ensaio de termografia na Parede 1 – vista v2.....	67
Fig. 5.15 – Resultados do ensaio de termografia na Parede 1 – vista v1.....	68
Fig. 5.16 – Resultados do ensaio de termografia na Parede 6 – vista v1.....	69
Fig. 5.17 – Ensaio de ultra-sons na Parede 2 – vista v4 e planta parcial do piso -1.....	70
Fig. 5.18 – Representação esquemática das malhas utilizadas no ensaio de ultra-sons pelos métodos directo e semi-directo na Parede 3 segundo as vistas v1, v2 e v3.....	71
Fig. 5.19 – Malhas no ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na Parede 2 – vista v4.....	71
Fig. 5.20 – Localização dos furos na Parede 5 – vista v3.....	73
Fig. 5.21 – Ensaio de determinação do teor de humidade na Parede 5 – vista v3.....	74
Fig. 5.22 – Ensaio de determinação do teor de higroscopicidade nas amostras da Parede 5 – vista v3.....	76
Fig. 5.23 – Planta parcial do piso -1 com indicação das paredes onde foi efectuado o ensaio de aderência.....	78
Fig. 5.24 – Procedimento utilizado no ensaio de aderência do revestimento ao suporte.....	79
Fig. 5.25 – Marcação vertical e “pastilhas” coladas na Parede 2 – vista v2.....	80
Fig. 5.26 – “Provetes” extraídos da Parede 2 – vista v2.....	80
Fig. 5.27 – Marcação vertical e “pastilhas” coladas na Parede 4 – vista v1.....	81

Fig. 5.28 – “Provetes” extraídos da Parede 4 – vista v1.....	81
Fig. 5.29 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 5 – vista v1.....	82
Fig. 5.30 – “Provetes” extraídos da Parede 5 – vista v1.....	82
Fig. 5.31 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 2 – vista v3.....	83
Fig. 5.32 – “Provetes” extraídos da Parede 2 – vista v3.....	84
Fig. 5.33 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 5 – vista v1.....	84
Fig. 5.34 – “Provetes” extraídos da Parede 5 – v1.....	85
Fig. 5.35 – Velocidade de ultra-sons (m/s) pelo método indirecto na direcção horizontal na Pr. 2 – vista v4.....	86
Fig. 5.36 – Velocidade de ultra-sons (m/s) pelo método indirecto na direcção vertical na Pr. 2 – vista v4.....	86
Fig. 5.37 – Teores de humidade (%) ao longo da Parede 5 – vista v3.....	87
Fig. 5.38 – Teores de higroscopicidade (%) ao longo da Parede 5 – vista v3.....	87
Fig. 5.39 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 2 – vistas v2 e v3.....	88
Fig. 5.40 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 4 – vista v1.....	88
Fig. 5.41 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 5 – vista v1.....	88
Fig. 5.42 – Parede 5 – vista v3 com o nível do passeio, corte d-e e a indicação do local onde se encontra a parede na fachada nascente.....	91

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 – Designação das paredes de edifícios antigos e a sua constituição.....	8
Tabela 4.1 – Equipamentos e a sua função para observação preliminar.....	30
Tabela 4.2 – Métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos segundo as características que permitem obter.....	36
Tabela 4.3 – Alcance e resolução nas frequências de antenas mais comuns no ensaio de radar.	42
Tabela 4.4 – Métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos segundo as anomalias que permitem detectar.....	55
Tabela 4.5 – Complementaridade dos métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos.....	56
Tabela 5.1 – Constituição das paredes estudadas e identificação dos ensaios efectuados.....	66
Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção horizontal, para a malha de 0,50 m.....	72
Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção vertical, para a malha de 0,50 m.....	72
Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção horizontal, para a malha de 0,25 m.....	72
Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção vertical, para a malha de 0,25 m.....	72
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio do teor de humidade para as amostras a 10 cm de profundidade.....	75
Tabela 5.7 – Resultados do ensaio do teor de humidade para as amostras a 20 cm de profundidade.....	75
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio do teor de higroscopicidade para as amostras a 10 cm de profundidade.....	77
Tabela 5.9 – Resultados do ensaio do teor de higroscopicidade para as amostras a 20 cm de profundidade.....	77
Tabela 5.10 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 2 – vista v2.....	80
Tabela 5.11 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 4 – vista v1.....	81
Tabela 5.12 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 5 – vista v1.....	82

Tabela 5.13 – Resultados da segunda série do ensaio de aderência na Parede 2 – vista v3.....	84
Tabela 5.14 – Resultados da segunda série do ensaio de aderência na Parede 5 – vista v1.....	85
Tabela 5.15 – Ensaio de ultra-sons realizado por Magalhães <i>et al.</i>	89
Tabela 5.16 – Resumo das tensões de aderência consideradas “válidas” nas paredes em estudo	93
Tabela 5.17 – Resultados do ensaio de aderência obtidos por Veiga.....	94
Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de aderência obtidos por Flores-Colen <i>et al.</i>	95

Capítulo 1

Introdução

1.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Entende-se por edifício antigo aquele que foi construído antes da chamada época do betão armado como material estrutural dominante, ou seja, uma construção edificada com base em materiais e tecnologias tradicionais, tais como a madeira, a pedra, a areia, o barro e a cal. Estes materiais eram utilizados na sua forma original ou com ligeiras transformações [1].

Na reabilitação de edifícios antigos são aplicadas técnicas e conhecimentos de uma forma geral distintos dos utilizados na construção de novos edifícios. Isto porque devem ter-se em conta aspectos fundamentais como [1, 18, 30, 43]:

- respeitar as características específicas da solução construtiva, prevenindo o seu adequado comportamento face às acções mecânicas previstas;
- garantir uma adequada compatibilidade física, química e mecânica entre os materiais existentes e os novos materiais a aplicar;
- salvaguardar o princípio da reversibilidade, isto é, garantir a possibilidade de voltar ao ponto de partida da intervenção, de forma a corrigir algumas opções menos acertadas;
- efectuar a mínima intervenção possível, no menor prazo exequível, de modo a diminuir o período de vulnerabilidade da construção.

A decisão de reabilitar um edifício antigo pode envolver um extenso trabalho de pesquisa e compreensão da sua história, pois qualquer construção antiga é o resultado da sua estrutura original e das eventuais alterações a que tenha sido sujeita. Desta forma, é necessária uma rigorosa investigação dos diversos elementos do edifício através de [5, 6, 30, 43]:

- levantamento da geometria do edifício, da sua história e evolução;
- identificação das causas das anomalias;
- escolha das técnicas de reabilitação e controlo da sua eficiência.

Nenhuma acção deve ser realizada sem primeiro compreender os respectivos benefícios/prejuízos para a construção. De facto, quando não é conhecido o estado real de conservação do edifício, os resultados da intervenção são imprevisíveis [5, 6, 30].

A fig. 1.1 apresenta um esquema com a metodologia para a reabilitação de edifícios. A aquisição de dados, o comportamento estrutural e o diagnóstico e segurança são processos iterativos, particularmente este último, no qual é avaliada a necessidade de se proceder ou não à intervenção.

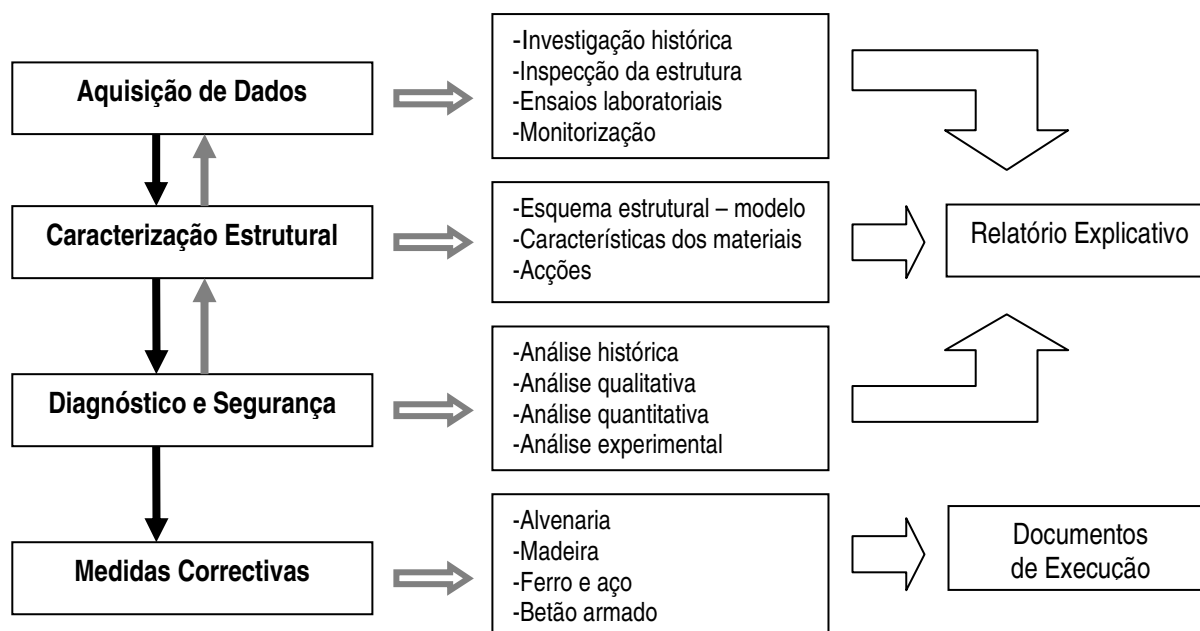


Fig. 1.1 – Metodologia para a reabilitação estrutural (adaptado de [30])

A avaliação da segurança do edifício deve ser realizada com base em aspectos qualitativos (documentos, observação, etc.) e quantitativos (experimentais, matemáticos e documentação técnica, etc.), tendo em atenção o seu comportamento estrutural, pois qualquer avaliação é afectada pela incerteza dos dados (acções, resistência, deformações, etc.), dos modelos e das hipóteses usadas na pesquisa [5, 6, 30].

Os ensaios de diagnóstico devem ser efectuados maioritariamente com métodos não destrutivos, embora por vezes seja necessário o recurso a métodos semi-destrutivos ou até destrutivos.

Estes ensaios podem ser utilizados para [5, 6, 30, 43]:

- detecção de elementos estruturais no interior das paredes;
- caracterização das alvenarias;
- avaliação dos danos (fendas, por exemplo);
- avaliação do teor de humidade.

No Capítulo 4 referem-se quais os métodos de diagnóstico que permitem efectuar a caracterização das alvenarias e a detecção das anomalias indicadas anteriormente.

O tipo e a extensão dos procedimentos e dos ensaios a realizar, *in situ* ou em laboratório, depende de alguns factores, como por exemplo [5, 6, 30, 43]:

- valor artístico ou histórico da construção;
- recursos disponíveis;
- tipo de danos;
- orçamento;
- tipo de intervenção desejada.

Em algumas situações pode ser necessário efectuar-se a monitorização ao longo do tempo de algumas anomalias presentes no edifício (tais como fendas ou assentamentos de fundações), de modo a acompanhar a sua evolução e prevenir maiores danos na estrutura [2, 5, 6, 30].

1.2 – MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

A principal motivação para a realização deste trabalho é identificar e compreender o funcionamento e o tipo de utilização de alguns métodos de diagnóstico para a detecção de anomalias em edifícios antigos, antes de se proceder ao projecto de reabilitação propriamente dito, de um edifício antigo. Com esta dissertação pretende-se abordar os principais métodos de diagnóstico em paredes de edifícios antigos e aplicar alguns desses métodos a um edifício. Para tal, é efectuada uma descrição das várias soluções construtivas existentes no nosso país, bem como das suas principais anomalias e respectivos métodos de ensaio.

1.3 – ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

O trabalho encontra-se dividido em seis capítulos, incluindo o presente, e três anexos, estruturados do seguinte modo:

No **Capítulo 2** descrevem-se as principais soluções construtivas de edifícios antigos existentes em Portugal, incluindo os principais elementos constituintes das fundações, paredes resistentes e de compartimentação e revestimentos.

No **Capítulo 3** efectua-se a descrição e caracterização das anomalias estruturais e não estruturais mais frequentes nas paredes e fundações dos edifícios antigos.

No **Capítulo 4** introduzem-se os principais métodos de diagnóstico de caracterização das anomalias em paredes de edifícios antigos.

No **Capítulo 5** aplicam-se alguns métodos de diagnóstico a um edifício antigo localizado em Lisboa, como exemplos de aplicação. Neste capítulo é também efectuada a análise e discussão dos resultados obtidos.

No **Capítulo 6** descrevem-se as principais conclusões obtidas com a realização deste trabalho, comparando os objectivos propostos com os alcançados.

Por fim, referem-se algumas possibilidades de continuação do trabalho apresentado.

No **Anexo I** introduz-se o modelo de boletim de ensaio criado para esta dissertação e utilizado no caso de estudo.

No **Anexo II** apresenta-se o boletim de ensaio preenchido para o ensaio de termografia.

No **Anexo III** apresenta-se o boletim de ensaio preenchido para o ensaio de determinação do teor de humidade de uma parede.

Todas as figuras sem referência bibliográfica foram obtidas pelo autor.

Capítulo 2

Soluções Construtivas de Fundações e Paredes de Edifícios Antigos

2.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

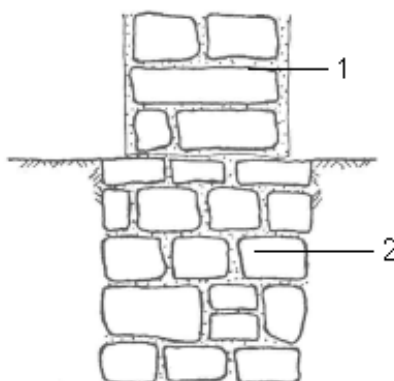
Neste capítulo sintetizam-se as principais soluções construtivas de edifícios antigos existentes no nosso país, como forma de caracterizar e enquadrar o diagnóstico das respectivas anomalias estruturais. Para uma correcta descrição dessas soluções construtivas, devem ser primeiramente compreendidos os elementos que as constituem, dos quais se destacam as fundações, paredes, pavimentos, coberturas e revestimentos. Entre estes elementos, são referidos as fundações, paredes e revestimentos, dado serem estes os principais alvos dos métodos de inspecção e diagnóstico estudados na presente dissertação.

2.2 – FUNDAÇÕES

As fundações dos edifícios antigos podem, em geral, ser de dois tipos, consoante a profundidade do solo de fundação, a sua capacidade resistente e as cargas transmitidas ao mesmo [1, 44, 47]:

- fundações directas (ou contínuas);
- fundações indirectas ou profundas.

Nas fundações directas, as paredes resistentes têm continuidade para o terreno, com um alargamento da espessura, entre 0,10 m a 0,15 m, fig. 2.1.



1 – parede resistente; 2 – fundação com sobrelargura

Fig. 2.1 – Representação esquemática de fundação directa [1, 44]

A sobrelargura tem como função aumentar a área de contacto da parede com o terreno, havendo assim, uma maior segurança relativamente à força de compressão [1, 39, 44, 47].

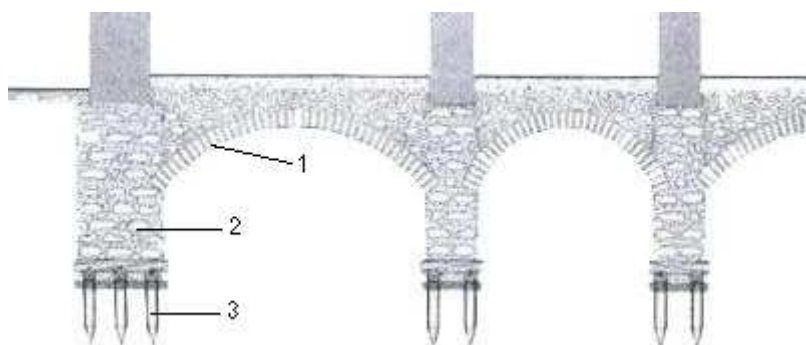
A ligação entre a parede resistente e a fundação devia ser executada recorrendo a um *enduntamento* contínuo nas zonas de transição/ligação, para garantir uma boa resistência às forças de deslizamento causadas, nomeadamente, pela acção sísmica [44].

As fundações indirectas eram utilizadas em edifícios com dois ou mais pisos, quando havia a necessidade de atingir uma maior profundidade (camadas mais resistentes do solo). Para este efeito, podiam ser executadas três tipos de soluções [1, 44]:

- caves com o pavimento inferior a uma cota tal que permitisse a abertura de fundações directas;
- abertura de poços preenchidos com alvenaria de pedra, que apoiavam em arcos também de alvenaria de pedra, de tijolo ou mistos (alvenaria de pedra e tijolo), sobre os quais eram executadas as paredes resistentes;
- fundações indirectas, por estacas de madeira. As estacas eram utilizadas em terrenos aluvionares com camadas brandas e regulares, pois estes possibilitavam a sua cravação, contrariamente aos estratos rijos, que destruíam as cabeças das estacas devido ao martelo do bate-estacas.

Na reconstrução da Baixa Lisboa, a seguir ao terramoto de 1755, as fundações foram executadas com o recurso a poços e arcos de alvenaria de pedra apoiados sobre estacas de madeira, fig. 2.2. Esta solução foi aplicada com êxito porque o nível freático permaneceu relativamente constante ao longo do tempo (para além dos terrenos serem do tipo mencionado anteriormente), com as estacas permanentemente húmidas, não havendo variação do teor de humidade (ciclos de molhagem / secagem), que está na origem do ataque dos fungos e carunchos [1, 33, 39, 44, 47].

As estacas eram normalmente de madeira de pinho verde com cerca de 1,80 m de comprimento e 0,15 m de diâmetro, estando posicionadas segundo linhas paralelas, na direcção das paredes-mestras [33].



1 – arco de alvenaria; 2 – poço de fundação; 3 – estacas de madeira

Fig. 2.2 – Representação esquemática de fundação indirecta, com estacas de madeira sob poços e arcos de alvenaria, característica dos edifícios da Baixa Pombalina (adaptado de [46, 47])

2.3 – PAREDES

As paredes dos edifícios antigos são elementos construtivos cujo comprimento e altura são bastante superiores à sua espessura. Estas podem ser divididas em paredes resistentes ou mestras (maioritariamente exteriores) e paredes divisórias (interiores), que em alguns casos adquiriram também função resistente [44].

2.3.1 – Paredes Resistentes

As paredes resistentes ou paredes-mestras são aquelas que tem uma função estrutural de resistência a cargas verticais (acção da gravidade) e cargas horizontais (vento e sismos).

Os frontais, utilizados nos edifícios da Baixa Pombalina, são exemplos de paredes resistentes interiores constituídas por um esqueleto de madeira (“Cruzes de Santo André”), preenchido com argamassa de cal e areia, pedras e elementos cerâmicos [1, 39, 41, 44].

As paredes resistentes têm geralmente uma espessura elevada (de 0,50 m a 1,50 m), apresentando na sua constituição materiais heterogéneos, com boa resistência à compressão, menor resistência ao corte e quase nula resistência à tracção e flexão, exceptuando-se as paredes exteriores de edifícios com andar de ressalto, em que a resistência ao corte e à tracção é mais elevada [1, 39, 42, 44]. A sua espessura tem como finalidade resistir às cargas horizontais derrubantes e reduzir o risco de instabilidade.

2.3.2 – Paredes de compartimentação ou paredes divisórias

Estas paredes dividem os espaços entre as paredes resistentes e permitem uma ligação entre os diversos elementos do edifício como paredes exteriores, pavimentos e cobertura, contribuindo para a estabilidade geral da estrutura, nomeadamente contraventamento às acções horizontais (durante a ocorrência de um sismo auxiliam na dissipação da energia). As paredes de compartimentação acabam também por estar sujeitas a um acréscimo de carga, devido à natural degradação e fluência dos materiais (pavimentos de madeira, por exemplo), sismos e assentamentos diferenciais das fundações, entre outros.

Umas das soluções particulares de paredes divisórias são os tabiques (descritos na secção 2.4.5), encontrando-se disseminadas um pouco por todo o país, e sendo até características dos edifícios pombalinos [1, 39, 41, 44].

2.3.3 – Revestimentos

Os revestimentos dos edifícios antigos têm como função, para além dos aspectos estéticos, proteger a parede das acções agressivas, como os agentes atmosféricos e outros. Os revestimentos

habitualmente utilizados nas paredes de alvenaria eram rebocos de argamassas fracas com cal aérea e areia, e em algumas regiões do país, como o Alentejo, eram de areia e barro.

As argamassas de cal e areia têm características que permitem um bom desempenho do revestimento como primeira camada de protecção das paredes, nomeadamente, reduzida rigidez, baixa retracção, razoável aderência ao suporte e boa trabalhabilidade, porém, possuem fraca resistência mecânica [1, 44]. Muitas vezes eram também utilizados azulejos, como protecção e decoração das paredes, pois permitiam uma maior durabilidade da parede (mesmo na ausência de manutenção), relativamente aos restantes acabamentos. Esta durabilidade era devida essencialmente à superfície vidrada do azulejo, que apresentava boas resistências mecânicas e químicas, aliada ao facto de a sua aplicação ser efectuada com argamassas que possibilitavam uma boa ligação entre o suporte e o azulejo, minimizando os efeitos da retracção durante a secagem (fenómeno que podia contribuir para a fendilhação dos azulejos).

O acabamento mais frequente nos edifícios antigos era a caiação, com três demãos. A cal, obtida a partir da cal viva, era facilmente solúvel na água da chuva, mesmo depois de seca, razão pela qual tinha de ser renovada uma ou duas vezes por ano [1, 44].

2.4 – PRINCIPAIS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DE EDIFÍCIOS ANTIGOS

Nesta secção, efectua-se uma caracterização das principais soluções construtivas de edifícios antigos em Portugal, sintetizando-se na tabela 2.1 as principais designações das paredes, directamente dependentes da sua composição.

Tabela 2.1 – Designação das paredes de edifícios antigos e a sua constituição (adaptado de [44])

Designação	Natureza e características dos materiais constituintes
Paredes de taipa e de adobe	Construções de terra
Alvenaria de tijolo	Paredes construídas com tijolo
Alvenaria de pedra irregular ou alvenaria ordinária (corrente)	Pedras toscas, com forma e dimensões irregulares, ligadas com argamassa de cal aérea e areia
Alvenaria de pedra seca	Pedras assentes por justaposição, apenas travadas entre si, sem qualquer tipo de argamassa
Paredes de cantaria	Pedras de cantaria com as faces devidamente aparelhadas, assentes em argamassa, ou apenas sobrepostas e justapostas
Paredes Mistas	Alvenaria e cantaria; alvenaria e tijolo; alvenaria com madeira, etc.

Seguidamente apresentam-se as principais características das paredes referidas na tabela 2.1:

2.4.1 – Construções de terra

As construções em terra são das mais antigas edificações conhecidas e surgiram da necessidade do homem se proteger das acções climáticas. As principais construções em terra são de taipa e de adobe.

Construções em taipa

A construção em taipa é originária das civilizações do crescente fértil Mesopotâmico e Antigo Egipto, há milhares de anos. Foi também utilizada pelos Romanos e Árabes.

Em Portugal, as primeiras casas em taipa datam de há cerca de 2500 anos, sendo esta construção característica de zonas rurais e com terra barrenta, nomeadamente Alentejo e Algarve, e de populações com pouco recursos económicos¹, fig. 2.3.

O material utilizado no seu fabrico era principalmente a terra argilosa. A qualidade da taipa dependia da terra, mais ou menos argilosa, da maior ou menor mistura de saibro, etc. A terra húmida era colocada entre taipais de madeira (com cerca de 3,0 m de comprimento e 1,0 m de altura, espaçados paralelamente entre si 0,50 m a 0,60 m, equivalente à espessura da parede) e compactada em camadas sucessivas e desencontradas, para melhor resistência [39, 44].



Fig. 2.3 – Construção em taipa [44]

Um dos pontos fracos destas construções era a humidade (ascendente ou resultante de inundações) pois eram edificadas com terra. Desta forma, as fundações, de alvenaria de pedra ou tijolo, tinham de estar entre 0,25 m a 0,60 m acima do terreno, para que não houvesse problemas de infiltração de água na parede (no caso de chuvas intensas). Para melhor resistência e contraventamento global da estrutura, as ligações entre as paredes eram reforçadas com ferrolhos metálicos [39, 44], fig. 2.4.

Para protecção contra choques acidentais, desgaste e outras acções mecânicas, os vãos de portas e janelas eram reforçados com tijolo, pedra ou madeira, nas ombreias e vergas.

O reboco das paredes de taipa era geralmente à base de argamassa de cal aérea e areia, seguido de caiação [39, 44].

¹ Exceptuando-se alguns casos como o Palácio Ducal de Vila Viçosa e o Castelo de Alcácer do Sal [44].

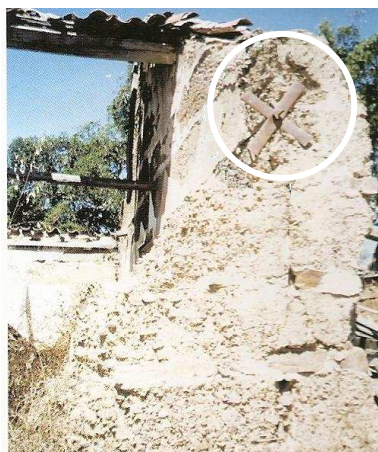


Fig. 2.4 – Ferrolhos metálicos para ligação das paredes de taipa [44]

Paredes de adobe

As paredes de adobe são também das soluções construtivas mais antigas. Em Portugal, o adobe era utilizado em “construções pobres”, tal como a taipa

Os blocos de adobe eram fundamentalmente constituídos por terra argilosa complementada com misturas de areia ou calcário. A argila era amassada com água e posteriormente modelada em tijolos com forma paralelepípedica, sendo estes cozidos ao sol, ou em fornos rudimentares, com temperaturas variáveis, fig. 2.5. O material de assentamento dos tijolos era também argila amassada com água, sendo posteriormente alterada para argamassa de cal aérea e areia [39, 44].



Fig. 2.5 – Construção em adobe [44]

Os blocos de adobe apresentavam uma fraca resistência à humidade e à intempérie (erosão acelerada), razão pela qual as fundações tinham de estar acima do nível do solo e as paredes de adobe tinham de ser revestidas com argamassa de cal aérea e areia seguido de caiçã, como as paredes de taipa [39, 44].

2.4.2 – Construções de alvenaria de tijolo

As construções em alvenaria de tijolo constituem uma evolução natural das paredes de adobe. Este aperfeiçoamento surgiu através do desenvolvimento de fornos capazes de cozer a matéria-prima do tijolo (pasta de argila, areia e água), fig. 2.6.

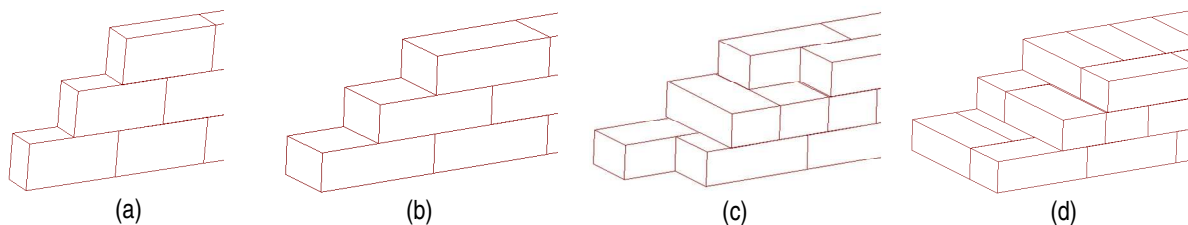


Fig. 2.6 – Alvenaria de tijolo maciço – Praça de touros do Campo Pequeno

Os tijolos maciços (também chamados de burro) ou furados tinham as dimensões de 23x11x7 (cm). A argamassa de assentamento devia ter alguma consistência e preencher os espaços livres entre os tijolos, de forma a conferir maior resistência [39, 44, 47].

A espessura das paredes de tijolo, à semelhança de outras paredes resistentes de edifícios antigos, era função do número de pisos e da dimensão das suas divisões interiores, mas as paredes de alvenaria de tijolo podiam ter uma espessura mais reduzida que as de pedra, porque a maior regularidade com que eram assentes originava maiores resistências (e menor condutibilidade térmica). Uma parede de tijolo de 0,35 m a 0,38 m equivalia a uma parede de alvenaria de pedra de 0,50 m [44, 47].

As paredes de tijolo podem ter várias espessuras, consoante a forma de assentamento do tijolo, fig. 2.7.



(a) pano de tijolo ao alto ou ao cutelo ; (b) pano de tijolo de meia vez;
(c) pano de tijolo de uma vez; (d) pano de tijolo a uma vez e meia

Fig. 2.7 – Representação esquemática de diversas espessuras de paredes de alvenaria de tijolo (adaptado de [44])

De modo a evitar a infiltração da humidade nas juntas e promover uma boa decoração, devia ser efectuado o seu refechamento ou vincagem (ainda na execução da parede), para a argamassa de refechamento entrar em contacto com a de assentamento. Para dar maior estabilidade e resistência às paredes exteriores, estas podiam ser interligadas por ferrolhos metálicos [39, 44].

2.4.3 – Construções de alvenaria de pedra

O termo “alvenaria” designa a aglomeração de um conjunto de blocos de pedra, geralmente com argamassa, com propriedades mecânicas capazes de originar elementos estruturais [47]. Esta solução foi muito utilizada pelos Romanos, existindo ainda bastantes construções históricas de alvenaria de pedra, que se encontram relativamente bem conservadas. Até meados do século XX, muitas paredes de edifícios de habitação, nos centros urbanos e em algumas zonas rurais, foram executadas principalmente com alvenaria de pedra [44].

Existem diversos tipos de construções de alvenaria de pedra no nosso país, consoante a sua origem e forma de ligação, entre as quais as descritas abaixo:

Alvenaria ordinária

As paredes de alvenaria ordinária eram construídas com pedra irregular em forma e dimensão (contendo por vezes vestígios de outros materiais como tijolos de barro), ligadas entre si por argamassa de cal aérea e areia, fig. 2.8.



Fig. 2.8 – Paredes de alvenaria ordinária de um edifício pós-Pombalino

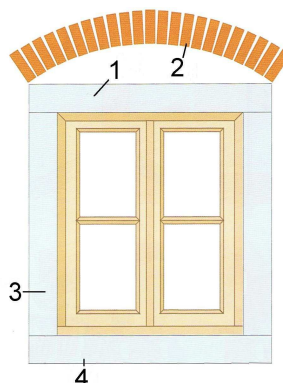
Depois de abertos os caboucos e executadas as fundações (normalmente directas), era iniciada a construção da parede, limpando e molhando as pedras, ligadas entre si pela argamassa de assentamento. Seguidamente marcavam-se os vãos de portas e janelas. A argamassa podia ser imediatamente aplicada no leito das pedras, procedendo-se ao seu assentamento, ou estas podiam ser primeiro colocadas em posição, sem argamassa, de forma a definir a sua melhor disposição. Em algumas fiadas horizontais, eram

intercalados perpianhos (pedras de forma regular e comprimento igual à espessura da parede) com pedras de menores dimensões, de forma adequada, para ocupar os espaços entre os perpianhos. Para uma construção de boa qualidade, estes deviam ser dispostos nas zonas correntes (zonas entre os vãos). A sua função era aumentar a resistência das paredes, face aos sismos, evitar a fendilhação vertical e melhorar a ligação das paredes resistentes ortogonais (fachadas com empenas). Ainda como reforço da ligação entre as paredes exteriores, podiam ser utilizados ferrolhos metálicos semelhantes aos das construções em taipa e de tijolo. Os ferrolhos não deviam introduzir esforços adicionais elevados nas paredes, pois quando traccionados excessivamente nos pontos de fixação à alvenaria, podiam causar o esmagamento da zona do apoio onde estavam aplicados [1, 39, 43, 44, 47]. Nos cunhais podiam também ser colocadas pedras mais ou menos aparelhadas, para dar maior estabilidade à estrutura, fig. 2.9.



Fig. 2.9 – Reforço dos cunhais

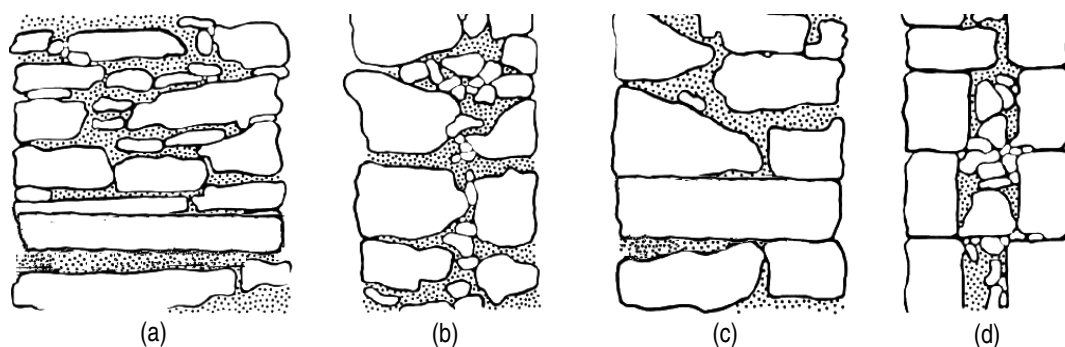
Também os vãos de portas e janelas tinham de ser reforçados, devido à interrupção da estrutura resistente e à elevada concentração de tensões nessas zonas, durante a ocorrência de sismos ou assentamentos de fundações. Os reforços podiam ser executados com lintéis (vergas ou padieiras) de pedra, sobre os vãos, apoiando-se na parede. Muitas vezes, eram também utilizados arcos de descarga, de tijolo maciço, que apoiavam na alvenaria dos nembos [1, 39, 43, 44, 47], fig. 2.10.



1 – verga; 2 – arco de descarga; 3 – ombreira; 4 – peitoril

Fig. 2.10 – Representação esquemática de reforço do vão de janela [1]

As paredes de alvenaria ordinária podiam ser constituídas por um ou vários panos. Podiam ser de pano único, de dois panos encostados, ou parcialmente ligados e de três panos [1, 39, 43, 44, 47], fig. 2.11.



(a) parede de um único pano; (b) parede de dois panos encostados;

(c) parede de dois panos parcialmente ligados; (d) paredes de três panos com núcleo de fraca qualidade

Fig. 2.11 – Representação esquemática das diversas constituições das paredes de alvenaria de pedra (adaptado de [5, 14, 47])

Nas paredes de alvenaria de pano único, as pedras encontravam-se imbricadas entre si, com perpianhos para travamento vertical. A parede de três panos correspondia a uma solução de menor qualidade, pois o núcleo central era preenchido com material de pequenas dimensões, mais frágil, o que podia provocar roturas, devido às acções verticais e horizontais. Nestas paredes de folhas múltiplas, os perpianhos eram muito importantes, porque minimizavam o abaulamento e a fendilhação vertical, através da ligação das folhas exteriores da alvenaria [1, 5, 6, 9, 14, 39, 43, 44, 47].

Alvenaria de pedra seca ou mal argamassada

Nas construções de alvenaria de pedra seca, as pedras eram justapostas, com pouca ou nenhuma argamassa de assentamento. Esta solução era muito utilizada em locais onde havia pouca cal para o fabrico de argamassas, e uma grande abundância de granitos e xistos (Alto Minho, alguns locais em Trás-os-Montes e nas Beiras e Alentejo) [39, 43, 44, 47], fig. 2.12.



Fig. 2.12 – Construção em alvenaria de pedra seca

Devido às suas características construtivas (pedra seca ou mal argamassada) e limitada resistência mecânica, estas paredes tinham uma altura limitada (nunca superior a dois pisos), com uma espessura média entre 0,60 m e 0,80 m. Na construção de uma parede de alvenaria de pedra seca deviam ser utilizadas pedras relativamente regulares, intercaladas com perpianhos. Esta alternância permitia uma melhor consolidação da parede aumentando a sua resistência mecânica.

Os vazios entre os blocos permitiam a acumulação da humidade ascendente, impedindo desta forma a sua penetração no interior da habitação, através de ascensão por capilaridade [39, 43, 44].

2.4.4 – Construções de cantaria e enxilharia

As construções de cantaria caracterizam-se pela existência de pedras aparelhadas com grandes dimensões e forma paralelepípedica e correspondem predominantemente a monumentos ou edifícios de grande valor histórico, fig. 2.13. Isto devia-se ao facto das paredes de cantaria serem uma solução construtiva mais cara, porque era utilizada pedra aparelhada e mão-de-obra especializada [39, 43, 44].



Fig. 2.13 – Paredes de cantaria – Mosteiro dos Jerónimos

No entanto, na maioria deste tipo de construções, a cantaria era apenas utilizada nos cunhais, colunas ou como forro da parede, sendo o seu interior constituído por alvenaria de pedra. As pedras do forro eram ligadas à alvenaria, através de gatos metálicos e argamassa. Tal como nas construções de alvenaria de pedra, também nas de cantaria eram utilizados perpianhos, alternados com pedras de dimensões mais pequenas (placas), para travamento vertical das paredes. Do mesmo modo, para reforçar as ligações entre as pedras de cantaria e impedir as deformações das paredes, eram utilizados gatos de ferro ou cavilhas de pedra, de madeira ou metálicas. No assentamento das pedras de cantaria, devia existir um certo cuidado, para que as juntas verticais não fossem posicionadas na mesma direcção vertical.

As paredes de enxilharia ou silharia distinguem-se das paredes de cantaria pela maior irregularidade dimensional das pedras. São constituídas por pedras mais grosseiras e menos cuidadas. O assentamento dos enxilhares era bastante semelhante ao das pedras de cantaria [39, 43, 44].

2.4.5 – Construções mistas

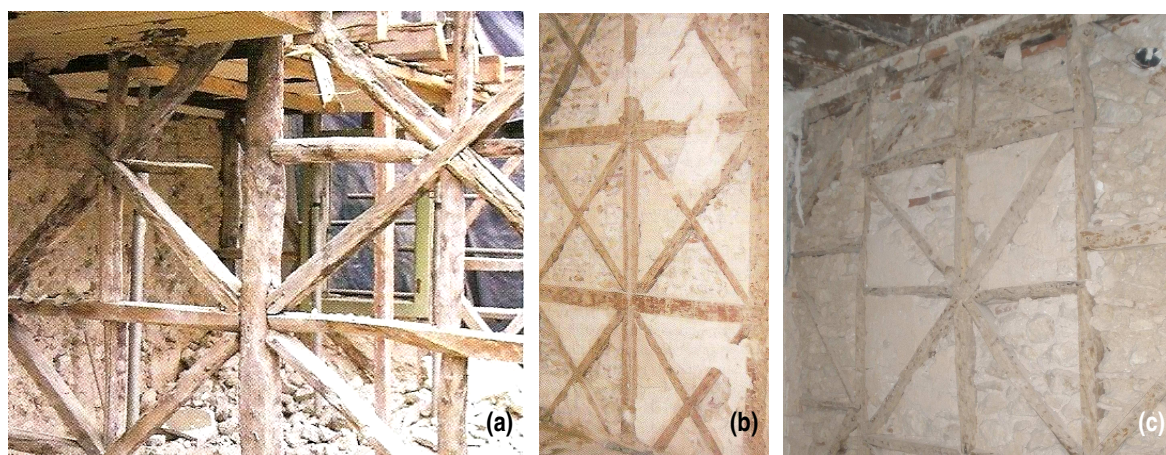
As construções mistas são soluções construtivas com predominância de dois ou mais materiais de construção nas paredes: alvenaria de pedra e madeira, cantaria e alvenaria, entre outros.

Um exemplo de referência de construções mistas em Portugal é a Baixa Pombalina, cujos edifícios foram construídos a seguir ao terramoto de 1755. Neles, foram utilizados dois materiais de construção fundamentais: a madeira e a pedra. Estes materiais “complementam-se” entre si, pelas suas características [1, 44]:

- boa resistência à compressão e ao fogo, da pedra;
- boa capacidade resistente à tracção e flexão, da madeira.

Estes edifícios são geralmente constituídos por cinco pisos, com o rés-do-chão amplo para lojas de comércio e os restantes andares para habitação. No 1º piso as janelas são de sacada, no 2º e 3º têm peitoril e no 4º piso são águas-furtadas. Apresentam uma geometria regular, com as paredes resistentes exteriores de alvenaria de pedra ligadas à “gaiola” interior e aos vigamentos do pavimento de madeira por meio de peças metálicas, de forma a garantir a transmissão de forças entre os elementos estruturais. A espessura média das paredes resistentes é cerca de 0,90 m no rés-do-chão, sendo ligeiramente reduzida nos andares superiores.

As paredes interiores podem ser de tabique ou de frontal. Os frontais correspondem a paredes resistentes interiores que, servem não só de paredes de compartimentação das principais divisórias do edifício, mas conferem também maior estabilidade e rigidez à estrutura. São constituídos por peças verticais (prumos), peças horizontais (travessas) e peças diagonais de madeira (escoras), formando uma armação designada por “Cruz de Santo André”, posteriormente preenchida com detritos de tijolo ou de pedra argamassada [1, 33, 39, 43, 44, 46], fig. 2.14.



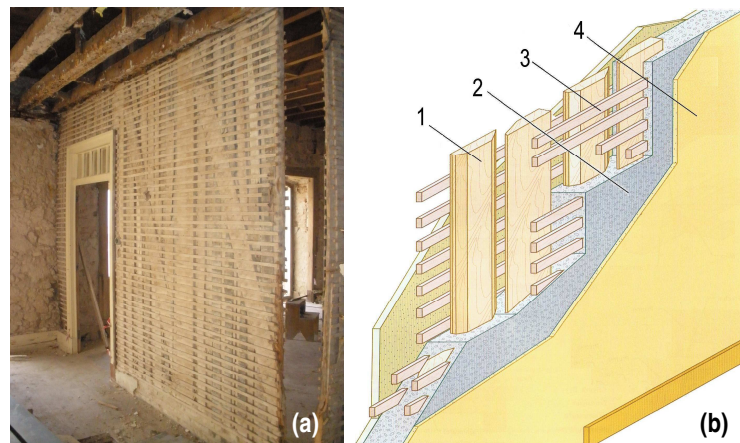
(a) e (b) “Cruzes de Santo André” de edifícios pombalinos [44];

(c) frontal com “Cruz de Santo André” de edifício pós-pombalino

Fig. 2.14 – Frontais com “Cruzes de Santo André”

Os frontais são dispostos perpendicularmente às paredes exteriores, com elementos de travamento adicionais em ambas as extremidades para ligação ao pavimento, sendo os vãos de portas e janelas também reforçados com vergas e pendurais.

As paredes de tabique apresentam uma espessura total entre 0,10 m a 0,12 m. Na sua execução, pregavam-se tábuas ao alto (costaneiras), com 1 cm de espaçamento, em duas réguas (uma fixada no tecto e outra no pavimento). Seguidamente, era pregado o fasquiado horizontal e saliente, perpendicular às costaneiras, para reter a argamassa do revestimento. Por fim, rebocavam-se com argamassa de cal e saibro, esboçavam-se e estucavam-se [1, 33, 39, 43, 44, 46], fig. 2.15.



1 – costaneiras; 2 – reboco; 3 – fasquiado; 4 – estuque
(a) tabique; (b) representação esquemática de uma parede de tabique (adaptado de [1])

Fig. 2.15 – Paredes de tabique

Em alguns casos (edifícios de melhor qualidade construtiva), os tabiques podiam ser executados com alvenaria de tijolo com espessura a meia vez.

A “gaiola” de madeira apresenta um bom comportamento a cargas verticais e horizontais (acção sísmica), porque todos os seus elementos, estrutura de madeira dos pavimentos, asnas da cobertura, paredes exteriores e interiores (frontais) e caixas de escadas, se encontram ligados entre si. Isto deve-se não só à disposição dos elementos de madeira, mas também às eficientes ligações entre estes, principalmente na ligação da “gaiola” ao rés-do-chão, através de gatos metálicos chumbados nas pedras das paredes (enxilhares).

As fundações dos edifícios pombalinos, como já referido anteriormente, são de alvenaria de pedra, apoiadas em arcos de alvenaria de tijolo ou pedra, que por sua vez eram assentes sobre longarinas e travessas ligadas, por cavilhas de aço forjado, às estacas de madeira [1, 33, 39, 42, 43, 44, 46] (fig. 2.2).

Os edifícios posteriores à construção pombalina (a partir de 1880 até cerca de 1930) são os chamados “gaioleiros” e correspondem a um tipo de construção diferente dos primeiros devido ao grande decréscimo da qualidade da construção (nomeadamente, da “mão-de-obra” e dos materiais) e ao

aumento da altura dos edifícios, fig. 2.16. Estes edifícios não possuem ligações adequadas entre os diversos elementos de contraventamento global da estrutura, como por exemplo, paredes exteriores e interiores ou paredes e pavimentos ou tectos [1, 11, 44].



Fig. 2.16 – Edifício “gaioleiro”

As suas principais características são [1, 11, 44]:

- fundações de alvenaria de pedra rija, com largura dupla das paredes (maior parte dos terrenos mal fundados);
- três tipos de paredes: paredes-mestras de alvenaria de pedra irregular com espessura de 0,90 m no rés-do-chão e 0,50 m no último piso; paredes resistentes de tijolo maciço nas empenas ou outros locais interiores, com 0,15 m a 0,30 m de espessura; paredes interiores de tabique apenas com tábuas colocadas ao alto (contraventamento defeituoso), com espessura média de 0,15 m;
- ferrolhos metálicos para travamento lateral de paredes;
- pavimentos de madeira, por barrotes apoiados directamente na parede, com pequena entrega e na direcção do menor vão;
- marquises reduzidas para instalação de sanitas no tardo do edifício, a partir de meados do século XX.

Na parte final do período, houve a necessidade de arejar e iluminar as zonas interiores, com a execução de saguões na zona central dos edifícios, pois estes tinham enormes áreas de implementação e grande profundidade [1, 11, 44].

Capítulo 3

Anomalias em Fundações e Paredes de Edifícios Antigos

3.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nos edifícios antigos, o envelhecimento dos materiais de construção é uma das causas de anomalias, provocando alteração das características, tais como, resistência mecânica e rigidez. Isto acontece quando os edifícios não são alvo de manutenção e reabilitação ao longo do tempo [1, 40, 41, 44], fig. 3.1.



Fig. 3.1 – Edifício antigo com ausência de manutenção

Porém, outras anomalias podem afectar estas construções, para além das que resultam ou são agravadas pela ausência de acções de conservação e manutenção. Neste sentido, descrevem-se as principais anomalias que podem ocorrer em paredes de edifícios antigos, tendo presente que muitas delas estão relacionadas entre si, e que numa mesma parede se podem encontrar diversas anomalias. As anomalias são referidas pelos diversos elementos constituintes das paredes, já estudados no capítulo anterior: fundações, paredes e revestimentos.

3.2 – ANOMALIAS EM FUNDAÇÕES

As anomalias em fundações de edifícios antigos podem ser devidas:

- às características do terreno de fundação;
- à própria fundação;
- à estrutura do edifício, quando as suas cargas são muito elevadas para as fundações existentes.

No terreno de fundação, a presença excessiva de água e a descompressão provocada por alteração do equilíbrio existente (devido, por exemplo, a escavações adjacentes) podem conduzir a assentamentos ou rotações diferenciais, seguidos de fendilhação nas paredes. Também o rebaixamento do nível freático, para execução de escavações nas imediações de edifícios antigos, pode ocasionar assentamentos ou rotações diferenciais.

No caso de anomalias na própria fundação, as mais comuns são a redução da secção de contacto entre a fundação e o solo e a degradação das características mecânicas das alvenarias e consequente movimentação diferencial das fundações. As causas mais frequentes destas anomalias são o envelhecimento dos materiais ou alterações na sua constituição, devido ao arrastamento dos finos da alvenaria da fundação pelas águas subterrâneas, ou pela exposição após escavações periféricas, superficiais ou em profundidade [1].

3.3 – ANOMALIAS EM PAREDES RESISTENTES

As anomalias mais frequentes em paredes resistentes são a fendilhação, a desagregação, o esmagamento, anomalias por acção da água, a oxidação dos elementos metálicos e a degradação dos elementos de madeira incorporados.

3.3.1 – Fendilhação

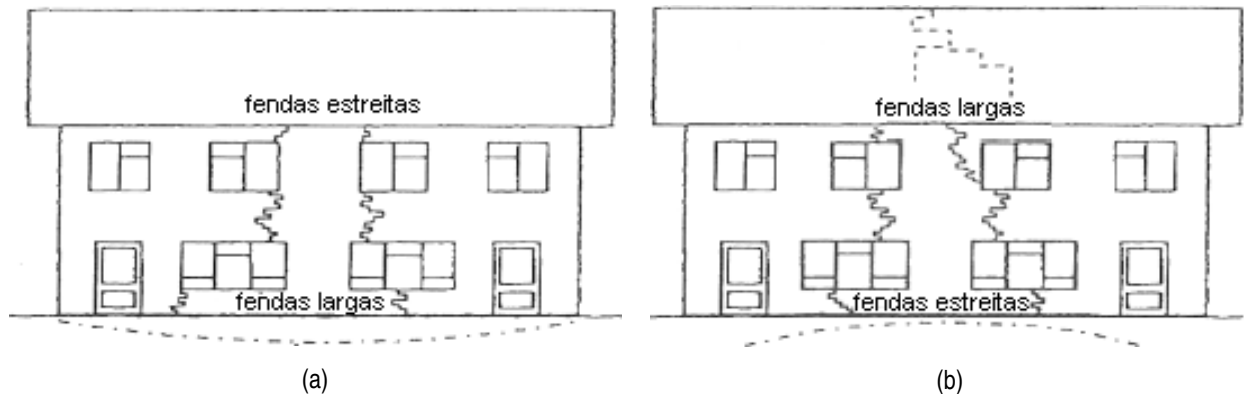
A fendilhação caracteriza-se pelo aparecimento de fendas, resultantes de movimentos diferenciais das fundações, acção sísmica, vibração causada pelo tráfego rodoviário de veículos pesados nas imediações do edifício ou deficiente ligação entre paredes ortogonais ou paredes e pavimentos, fig. 3.2.



Fig. 3.2 – Fendilhação numa parede

A fendilhação pode ocorrer em zonas correntes, mas surge mais frequentemente nos pontos mais frágeis das paredes, como vãos de portas e janelas, ligação de paredes ortogonais ou em locais de fendas anteriores. Quando são devidas a assentamentos diferenciais das fundações, as fendas

apresentam inclinações que ajudam a identificar a possível localização da zona da fundação onde esta ocorreu [1, 4, 40, 41, 43, 44], fig. 3.3.



(a) assentamento da fundação na zona central da fachada; (b) assentamento da fundação nas zonas laterais da fachada

Fig. 3.3 – Esquemas de fendilhação por assentamento diferencial da fundação (adaptado de [10])

Se o assentamento ocorrer na zona central da fachada, poderão surgir fendas mais largas em baixo e mais estreitas em cima, fig. 3.3 a. Caso o assentamento ocorra nas zonas laterais da fachada (fundações das empenas), poderá suceder o contrário (fendas mais largas em cima e mais estreitas em baixo), fig. 3.3 b [10].

Se as ligações entre paredes ortogonais (com tirantes) ou entre paredes e pavimentos (com ferrolhos metálicos) forem adequadas, existe uma grande redução dos fenómenos de fendilhação pois os esforços são distribuídos entre todos os elementos estruturais.

As elevadas concentrações de tensões nos cantos e nos contornos das aberturas dos vãos, associadas à falta de resistência dos lintéis superiores ou dos arcos de descarga, podem ser responsáveis por fendas ou fissuras. Também a acção sísmica pode provocar esforços de corte elevados nessas zonas, com fendas cruzadas aproximadamente com 45° de inclinação. Deste modo, nas construções de melhor qualidade, eram colocadas em tornos das aberturas, pedras talhadas de grandes dimensões ou arcos de tijolo maciço para aumentar a capacidade resistente local da parede [1, 40, 41, 44].

3.3.2 – Desagregação

A desagregação é uma anomalia comum e resulta muitas vezes do agravamento das fendas existentes e do envelhecimento natural do edifício. Se forem efectuadas reparações dos rebocos degradados e substituição dos elementos afectados (tijolos, pedras, etc.), a alternância dos agentes climáticos não provoca problemas de desagregação tão acentuados nas alvenarias. [1, 40, 41, 44].

Outros factores que contribuem para esta anomalia são a humidade de precipitação ou de infiltrações de várias origens, como humidade ascendente do terreno (mais frequente ao nível do rés-do-chão),

que provocam remoção dos finos da argamassa de assentamento, principalmente nas paredes de folha dupla (com núcleo interior mais pobre) [1, 40, 41, 42, 43, 44], fig. 3.4.



Fig. 3.4 – Desagregação da alvenaria

3.3.3 – Esmagamento

O esmagamento das paredes surge geralmente em zonas localizadas, como pontos de aplicação de cargas concentradas excessivas (por ex: descarga de vigas em paredes, sem a presença de apoios ou outros reforços locais, que diminuam as tensões nos pontos de apoio). Neste caso, é corrente nas construções de qualidade, o reforço naquelas zonas, com pedras de boa resistência, com as faces superiores aparelhadas colocadas sob os pontos de aplicação de forças resultantes de vigas de pavimento ou de asnas de cobertura, atenuando a tensão e diminuindo o esmagamento local, por exemplo como representado na fig. 3.5. Pode ainda ocorrer esmagamento em edifícios antigos adjacentes a construções novas que tenham caves com muros de suporte ancorados, pois a pressão da injeção das ancoragens pode criar tensões ascendentes no solo, transmitidas às fundações e às paredes originando esmagamentos ao nível do primeiro piso [1, 40, 41, 44].

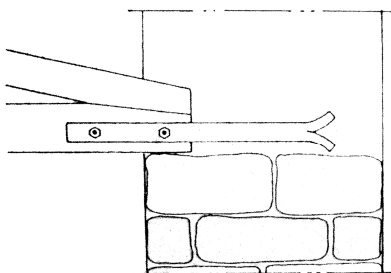


Fig. 3.5 – Pormenor do apoio das asnas numa parede [1, 44]

3.3.4 – Acção da água

A água está na génese ou no agravamento de diversas anomalias em paredes de edifícios antigos, fig. 3.6. Esta pode ter várias origens [27, 40, 44]:

- humidade de precipitação;
- humidade ascendente do terreno;

- humidade de condensação;
- humidade devido a rotura de tubagens, etc.

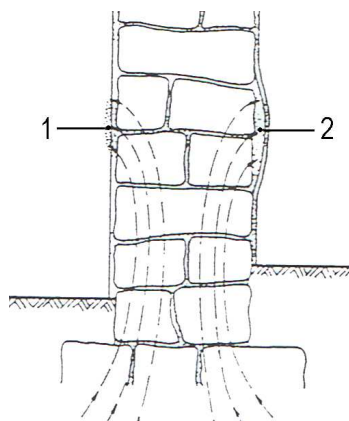
A humidade de precipitação é causada pela penetração de água da chuva no interior da parede, através de fissuras existentes no paramento exterior ou pelas juntas da argamassa (em pedras ou tijolo à vista). Quanto mais fendilhada ou desagregada estiver a parede, maior é a entrada da água, provocando mais anomalias. [1, 25, 27, 40, 41, 44].



Fig. 3.6 – Degradação de parede pela acção da água

A água da chuva é especialmente gravosa nas construções de terra, nomeadamente nas paredes de taipa e adobe, podendo conduzir a importantes desmoronamentos, uma vez que a humidade provoca a perda de coesão e de integridade da taipa [44].

Nos casos de humidade do terreno, a água que ascende por capilaridade vai dissolvendo os sais solúveis da alvenaria, das argamassas e do solo, até que as condições de temperatura e humidade relativa provoquem a sua evaporação, com a consequente deposição e cristalização dos sais, provocando eflorescências (se estes cristalizarem à superfície da parede) ou criptoflorescências (se a cristalização ocorrer entre o reboco e a alvenaria), originando desagregações, empolamentos do reboco e a degradação da alvenaria [1, 3, 15, 27, 40, 41, 44], fig. 3.7.



1 – eflorescências (cristalização superficial de sais); 2 – criptoflorescências (cristalização de sais abaixo da superfície)

Fig. 3.7 – Representação esquemática da formação de eflorescências e criptoflorescências [27, 44]

A humidade de condensação resulta do vapor de água que condensa nos paramentos interiores das paredes e mesmo entre a alvenaria, verificando-se em situações de baixa temperatura ambiente e fraca ventilação (no interior das habitações), provocando manchas de bolores. Ocorre usualmente nos períodos mais frios do ano, quando o ar ambiente entra em contacto com as paredes (com temperatura superficial inferior), provocando o aumento da humidade relativa dessa camada de ar [1, 27, 40, 41, 44]. Como se pode observar pelo diagrama psicométrico da fig. 3.8, a uma massa de ar com temperatura de 10°C e humidade relativa de 70% corresponde uma humidade absoluta de 6,5 g/m³. Se essa massa de ar diminuir para 0°C, o seu limite de saturação (valor da humidade absoluta quando a humidade relativa é de 100%) é de 5 g/m³. Desta forma, o vapor de água em excesso (6,5 g/m³ – 5 g/m³) condensará [27].

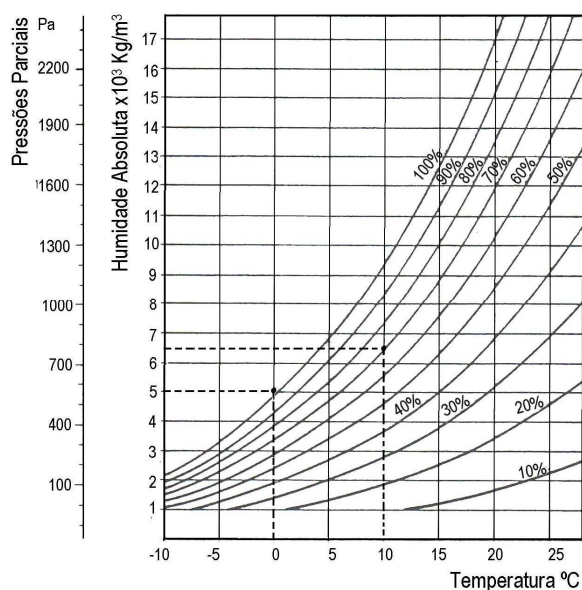


Fig. 3.8 – Diagrama psicométrico (adaptado de [27])

Também as águas resultantes da rotura das tubagens podem provocar anomalias de desagregação, se forem residuais ou industriais, devido ao seu grau de agressividade química [1, 27, 40, 41, 44].

Ainda relacionado com a presença de água e a sua acção nas construções, há a referir o aparecimento de colónias de líquenes, especialmente em ambientes caracterizados pela ausência de poluição. Estes organismos são formados por uma simbiose² entre uma alga e um fungo. A alga produz a matéria orgânica e o fungo (que envolve a alga) protege-a e absorve a água do exterior.

Os líquenes provocam danos nas pedras, na estatuária e em paredes de cantaria, nomeadamente degradação mecânica (desprendimento de fragmentos de pedra) e química (libertação de ácidos que reagem com o calcário acelerando a degradação). Nas coberturas dos edifícios com telhas cerâmicas também é vulgar a ocorrência deste tipo de situações [44].

² Simbiose é uma associação reciprocamente vantajosa entre dois ou mais organismos vivos de espécies diferentes [60]

3.3.5 – Oxidação de elementos metálicos

Os elementos metálicos em contacto com o oxigénio presente na água e no ar oxidam e enferrujam. A oxidação é comum em escadas ou varandas metálicas, que não tenham protecção adequada. Também a oxidação dos elementos de travamento das paredes (ferrolhos metálicos), pode provocar o seu aumento de volume, levando à fendilhação dos revestimentos de azulejos [1, 40, 41, 42, 44], fig. 3.9.



Fig. 3.9 – Oxidação e aumento de volume de ferrolho metálico

Por vezes, quando estes elementos se encontram ocultos, as anomalias resultantes da oxidação só podem ser detectadas pela observação de escorrimentos de manchas acastanhas nas paredes, formação de empolamentos, pequenas fendas ou através da termografia, descrita no Capítulo 4 [1, 40, 41, 44].

3.3.6 – Acção dos agentes biológicos em elementos de madeira

Os agentes biológicos que atacam os elementos de madeira são os fungos de podridão, os insectos, as térmitas e os carunchos. Esta anomalia está relacionada com a infiltração sazonal da humidade nas paredes, seja através do paramento exterior das paredes resistentes seja pela junta entre dois edifícios, diminuindo significativamente a resistência mecânica da madeira, fig. 3.10.



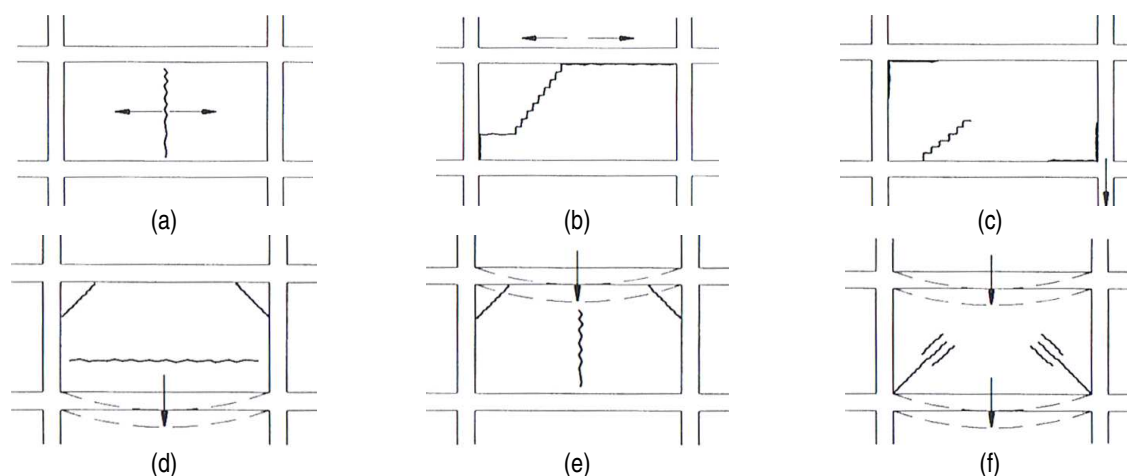
Fig. 3.10 – Degradação dos elementos de madeira numa parede

A degradação dos elementos de madeira ocorre também com o rompimento de tubagens de redes de águas e esgotos, em grês, que atravessam as paredes. Estas tubagens são as mais afectadas devido ao contraste entre a sua rigidez e a ductilidade das paredes que incorporam elementos de madeira. No entanto, a água só vai afectar as paredes quando estiver no seu interior, em permanência e em contacto com a madeira [1, 40, 41, 42, 44].

3.4 – ANOMALIAS EM PAREDES DE COMPARTIMENTAÇÃO

Como referido no Capítulo 2, as paredes de compartimentação podem ter uma importante função estrutural no edifício ao longo do tempo. Os principais factores que provocam este acréscimo da capacidade resistente em paredes interiores são os assentamentos diferenciais de fundações, com fendilhação das paredes resistentes e a deformação acentuada nos pavimentos de madeira.

A fendilhação das paredes de compartimentação também é uma das anomalias possíveis de ocorrer. Através da configuração e do carácter cíclico ou irreversível da fenda, é possível apurar a sua origem. Na fig. 3.11 é apresentado um esquema com alguns dos tipos de fendilhações mais frequentes em paredes divisórias, bem como a sua causa [1, 40, 41, 44].



(a) retracção da parede; (b) variações térmicas; (c) assentamento de fundações;

(d) deformação por flexão de pavimentos – pavimento inferior mais deformável;

(e) deformação por flexão de pavimentos – pavimento superior mais deformável;

(f) deformação por flexão de pavimentos – pavimento inferior e superior com igual deformação

Fig. 3.11 – Esquemas de fendilhações mais frequentes e respectivas causas em paredes divisórias [44]

Há ainda a referir uma anomalia bastante vulgar, que tem a ver com o desajustamento face a algumas exigências funcionais, como o isolamento acústico (devido à leveza destas paredes) e a resistência ao fogo (muito limitada no caso de ser utilizada madeira com pequena espessura). Outras anomalias menos comuns (devido à localização destas paredes) são o envelhecimento dos seus materiais constituintes e a presença de água [1, 40, 41, 44].

3.5 – ANOMALIAS EM REVESTIMENTOS DE PAREDES EXTERIORES E INTERIORES

A maior parte das anomalias nos revestimentos de paredes exteriores, ocorrem também nos revestimentos das paredes interiores. Estas anomalias estão relacionadas com as do próprio suporte, mas têm alguns aspectos específicos. As mais frequentes são a fendilhação, a desagregação, o esmagamento e a acção dos agentes climáticos.

3.5.1 – Fendilhação

Em paredes rebocadas com argamassa de cal aérea, a fendilhação pode ocorrer devido à fendilhação do próprio suporte, pelas razões já mencionadas na secção 3.3.1, ou devido à retracção da argamassa do reboco (retracções elevadas se a argamassa for à base de cimento) [1, 40, 41, 44].

No caso dos revestimentos de azulejos, estes podem sofrer desprendimento e fendilhação. O desprendimento está associado à rotura entre os azulejos e a argamassa de ligação, por tracção no reboco ou compressão nos azulejos, fig. 3.12. A fendilhação pode surgir se a resistência do azulejo for inferior à da ligação reboco-azulejo, ou se a argamassa de ligação tiver um módulo de elasticidade (rigidez) superior ao dos azulejos. Se a fendilhação ocorrer logo após a aplicação dos azulejos, a causa poderá ser a retracção do reboco [1, 40, 41, 44].



Fig. 3.12 – Desprendimento do revestimento de azulejos

3.5.2 – Desagregação

Uma das principais causas da desagregação do revestimento em paredes é a humidade, consequência da ascensão de água por capilaridade ou da chuva incidente na envolvente do edifício, fig. 3.13. Esta humidade transporta os sais presentes na alvenaria, que depois de dissolvidos cristalizam, com a evaporação da água, e atingem a superfície da parede originando eflorescências ou criptoflorescências, como referido anteriormente [1, 40, 41, 44] (fig. 3.7).



Fig. 3.13 – Desagregação do revestimento da parede

A desagregação é própria de rebocos fracos, com baixa resistência mecânica (rebocos com argamassa de cal) ou com pinturas pouco permeáveis ao vapor de água. Em paredes rebocadas com argamassas fortes, à base de cimento (que impedem ou dificultam a saída/difusão do vapor de água), a água permanece no interior da parede, aumentando consideravelmente os efeitos de desagregação. Nesta situação, os revestimentos interiores passam a sofrer uma degradação mais rápida e a água tende a evaporar pelo paramento interior da parede exterior, provocando criptoflorescências [1, 40, 41, 44].

3.5.3 – Esmagamento

As causas do esmagamento nos rebocos são essencialmente as mesmas das paredes resistentes. Se o reboco for à base de argamassas de cal aérea, os fenómenos de esmagamento podem aumentar devido à menor resistência mecânica destas argamassas [1, 40, 41, 44].

3.5.4 – Acção dos agentes climáticos

Os revestimentos das paredes exteriores estão também sujeitos à acção dos agentes climáticos, como as partículas abrasivas transportadas pelo vento (que podem provocar acções de desgaste nas paredes) e a acção da água das chuvas, já descrita anteriormente. Do mesmo modo as variações de temperatura, através do aumento ou diminuição do volume dos materiais, provocam anomalias, como fendilhações ou desagregações [1, 40, 41, 44].

Capítulo 4

Métodos de Diagnóstico de Anomalias de Paredes de Edifícios Antigos

4.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

A adequada reabilitação de um edifício antigo pressupõe o levantamento rigoroso de todos os elementos da construção, do seu estado de conservação e das anomalias estruturais existentes.

Para este diagnóstico, podem ser realizados ensaios *in situ*, através de métodos preferencialmente não-destrutivos, embora por vezes seja necessário o recurso a métodos semi-destrutivos ou até mesmo destrutivos.

Muitas vezes, torna-se necessário utilizar dois ou mais métodos de ensaio no mesmo elemento construtivo, de forma a complementar ou confirmar o diagnóstico. A informação adquirida com os métodos utilizados pode também ser complementada com ensaios laboratoriais efectuados nas amostras recolhidas. Posteriormente à conclusão do diagnóstico, deve proceder-se à interpretação dos resultados obtidos, de modo a que, em fase de projecto, seja seleccionada a melhor forma de reabilitar o edifício [4, 5, 6, 8, 14, 43].

Uma vez que o principal objectivo desta dissertação é compreender o funcionamento e o tipo de utilização dos principais métodos de diagnóstico de anomalias em paredes de edifícios antigos, bem como a sua aplicação numa ou em várias paredes, os Capítulos 4 e 5 são os mais importantes deste trabalho. No presente capítulo, apresentam-se as várias fases para o diagnóstico de um edifício antigo, nomeadamente nas paredes de alvenaria de pedra:

- observação preliminar;
- levantamento geométrico da construção;
- identificação do funcionamento estrutural do edifício;
- identificação e monitorização das anomalias;
- definição dos ensaios a realizar.

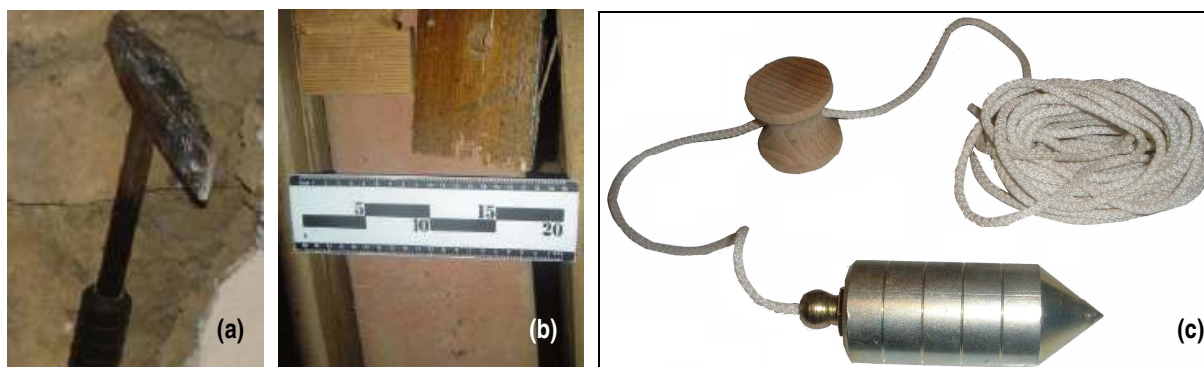
No capítulo 5 utilizam-se alguns métodos de diagnóstico *in situ* e laboratoriais em algumas paredes de um edifício antigo localizado em Lisboa, como exemplos de aplicação, e efectua-se ainda a caracterização e a descrição das principais anomalias do edifício.

4.2 – OBSERVAÇÃO PRELIMINAR

A observação preliminar compreende a recolha dos documentos de projecto original do edifício, ou de possíveis alterações a que este possa ter sido sujeito e a observação qualitativa (visual ou com equipamentos simples), das anomalias e do estado geral do edifício. Para um conhecimento mais detalhado deste estado, do seu historial ou de outras informações relevantes, devem ser contactados os donos, responsáveis ou residentes do edifício [4, 5, 6, 8, 14, 43]. A observação preliminar pode ser realizada com alguns instrumentos simples, indicados na tabela 4.1 e na fig. 4.1:

Tabela 4.1 – Equipamentos e a sua função para observação preliminar (adaptado de [14])

Equipamento	Função
Martelo de geólogo (fig. 4.1 (a))	Avaliação da compacidade e do estado da argamassa ou da pedra
Decímetro (fig. 4.1 (b))	Obtenção de fotografias com escala e realização de medições
Lupa para fissuras	Medição e observação de fissuras e pormenores
Lanterna eléctrica	Iluminação do local
Espelho com haste	Inspecção de zonas de difícil acesso
Máquina fotográfica	Obtenção de fotografias
Nível de pedreiro	Deteção de desníveis e inclinações
Fio-de-prumo (fig. 4.1 (c))	Deteção de inclinações e desaprumos
Fissurómetro (fig. 4.6)	Monitorização de fissuras
Humidímetro (fig. 4.19)	Deteção qualitativa de humidade em paredes e outros elementos



(a) martelo de geólogo [36]; (b) decímetro [36]; (c) fio-de-prumo

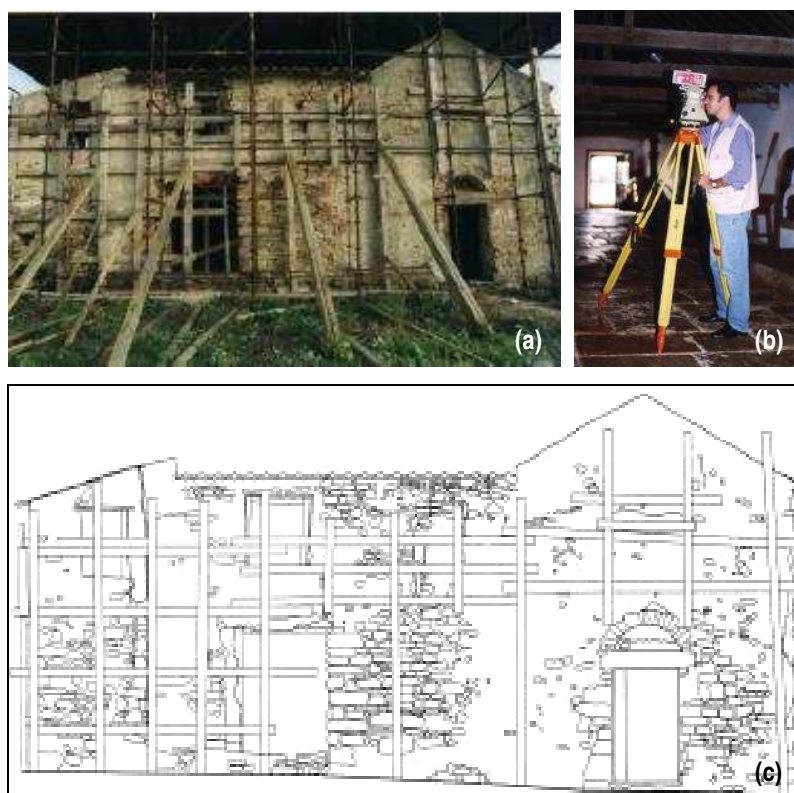
Fig. 4.1 – Alguns instrumentos para observação preliminar

Nesta observação deve ser recolhido o maior número possível de informações, através de registos fotográficos e do seu enquadramento nas plantas, cortes e alçados do edifício. Além disso, deve ter-se em atenção todos os elementos, nomeadamente, terreno de fundação e respectivas fundações, paredes resistentes ou interiores, coberturas, guarnecimento dos vãos, elementos estruturais, pavimentos e tectos [2, 5, 6, 8, 14]. A observação preliminar é de extrema importância, pois permite concluir, em primeira análise, a necessidade de se proceder a intervenção urgente ou não. Se a estrutura estiver muito danificada, existindo o risco real de colapso, deve executar-se uma estabilização

temporária através de escoramentos, cintagens ou outros, de modo a prevenir algum movimento estrutural que possa pôr em perigo pessoas ou bens [2, 4].

4.3 – LEVANTAMENTO GEOMÉTRICO DA CONSTRUÇÃO

A definição geométrica da construção é feita recorrendo aos elementos de projecto já existentes (plantas, cortes e alçados). Caso não exista projecto ou este não apresente dados suficientes (ou estejam incorrectos devido a posteriores alterações), deve ser efectuado um levantamento das superfícies, manualmente (muito menos preciso e mais moroso) ou através da fotogrametria [2, 6, 14, 37]. Esta última técnica é executada através do levantamento fotográfico do edifício de vários ângulos diferentes, seguido do cálculo das suas coordenadas por processos topográficos. Os pontos coordenados são definidos por meio de um taqueómetro com um distanciómetro *laser*, permitindo a obtenção de qualquer ponto na fachada. Posteriormente, com *software* apropriado, é efectuada a restituição da imagem tridimensional em gabinete [14, 37], fig. 4.2. O levantamento fotogramétrico é particularmente útil em construções antigas, com elementos muito detalhados, pois permite obter imagens precisas, a escalas variáveis, bem como referenciar as anomalias observadas nos elementos em que foi efectuado o levantamento. Contudo, deve ser efectuado por técnicos experientes, pois em algumas situações poderão surgir dificuldades para “captar” de forma apropriada as coordenadas dos pontos [6, 14, 37].

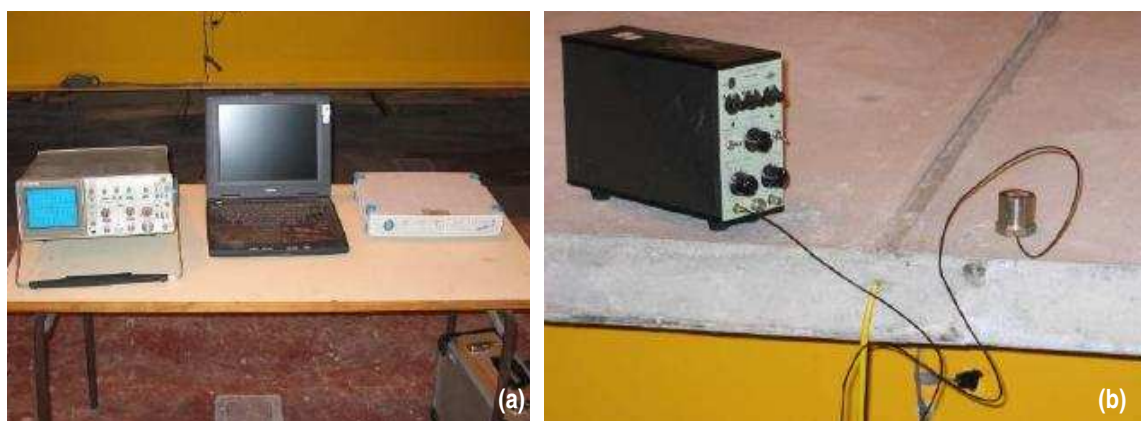


(a) levantamento fotográfico; (b) levantamento topográfico; (c) restituição da imagem digital em gabinete

Fig. 4.2 – Fases do levantamento fotogramétrico [14]

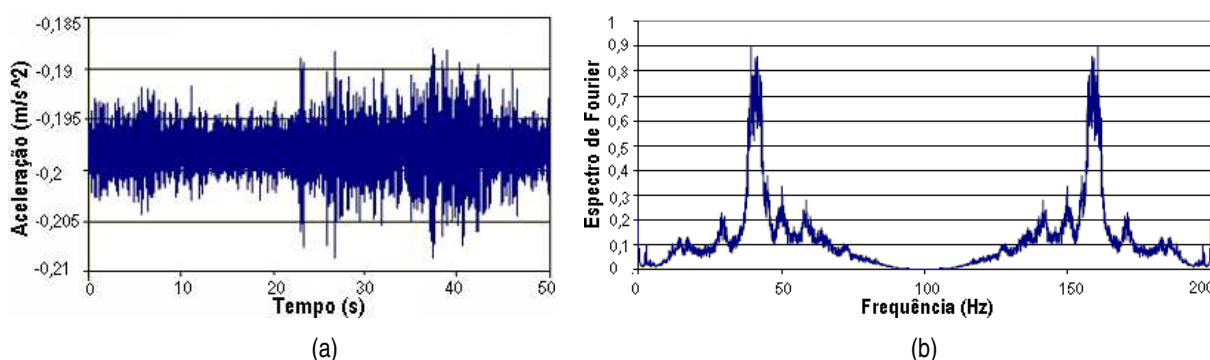
4.4 – IDENTIFICAÇÃO DO FUNCIONAMENTO ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO. ENSAIOS DINÂMICOS

A identificação do funcionamento estrutural consiste na caracterização do comportamento dinâmico da estrutura e integridade do edifício (nomeadamente à acção sísmica), no seu conjunto, avaliando as frequências principais de vibração e o coeficiente de amortecimento nas várias direcções. Para isso, devem ser conhecidas e analisadas as cargas e/ou outras acções actuantes na estrutura. Apesar de ser possível analisar o comportamento estrutural do edifício com base em programas de modelação de estruturas, os ensaios dinâmicos auxiliam na “validação” do modelo pela medição da evolução das deformações e vibrações ao longo do tempo, através de solicitações dinâmicas [6, 11, 12, 14, 16, 22], fig. 4.3. O estudo dinâmico da estrutura pode ser efectuado através de dois processos. O primeiro é realizado mediante factores como o vento e o tráfego de viaturas pesadas nas imediações. No segundo processo, estrutura é submetida a vibrações forçadas de baixa intensidade, para não comprometer a sua integridade estrutural. Os resultados são registados com recurso a sensores de vibrações (por exemplo acelerómetros), colocados em determinados pontos específicos do edifício, sendo os dados analisados em termos de amplitude e frequência de onda [2, 11, 14, 19, 43], fig. 4.4.



(a) equipamento de leitura e aquisição de dados; (b) acelerómetro com amplificador

Fig. 4.3 – Equipamento para ensaios dinâmicos [22]



(a) acelerações obtidas; (b) função do espectro de Fourier

Fig. 4.4 – Exemplos de resultados obtidos com os ensaios dinâmicos (adaptado de [11])

A partir da medição das acelerações (fig. 4.4 a), induzidas pelos dois processos referidos anteriormente, é possível estimar as frequências (fig. 4.4 b), através da transformada finita de Fourier [2, 11]. Os resultados obtidos com os ensaios dinâmicos permitem calibrar os modelos analíticos de elementos finitos da estrutura, tendo a vantagem de ser um método não destrutivo [2, 11, 14, 43].

4.5 – IDENTIFICAÇÃO E MONITORIZAÇÃO DAS ANOMALIAS

As anomalias devem ser identificadas através de registo fotográfico detalhado e localizadas nas plantas, alçados ou cortes da construção. O seu levantamento deve ser efectuado tomando especial atenção aos defeitos estruturais, nomeadamente fendas e a sua distribuição ao longo das paredes, fig. 4.5, bem como a averiguação das possíveis causas de instabilidade [2, 4, 5, 6, 8, 14, 19].

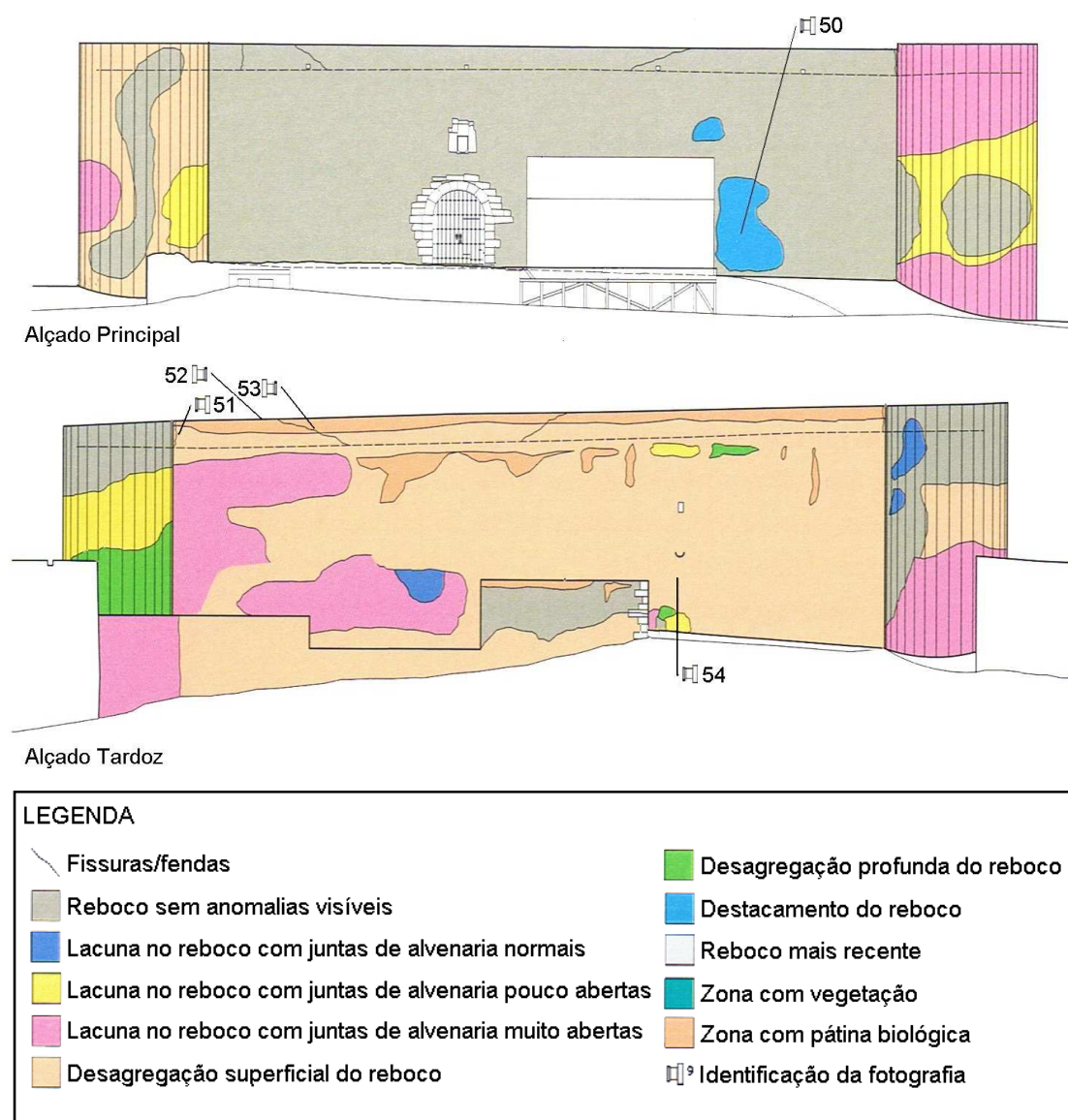


Fig. 4.5 – Exemplo de levantamento de anomalias em paredes de edifício antigo (adaptado de [14])

A interpretação das causas de anomalias é um factor muito importante para perceber o estado geral do edifício e o tipo de monitorização ou de ensaios de diagnóstico a definir, bem como as acções de

reabilitação a implementar. Em alguns casos, o acompanhamento da evolução do tipo de fendas é decisivo para prevenir o possível colapso da estrutura. Quando é detectado um padrão de fendas devido a assentamentos diferenciais, variações de temperatura ou cargas excessivas, o valor do deslocamento na estrutura pode ser monitorizado ao longo do tempo através de fissurómetros. Estes são fixos à parede através de cola adequada, fita adesiva de dupla face ou parafusos e devem ser colocados na direcção mais próxima da normal à fissura. O centro do reticulado tem de coincidir com a fissura, fig. 4.6. O fissurómetro é constituído por duas escalas (vertical e horizontal com 1 mm de precisão), permitindo medir deslocamentos na direcção longitudinal e transversal. Antes da sua colocação, deve ser medida e registada a abertura inicial da fissura, para que no final da monitorização se possa determinar se esta aumentou [2, 4, 5, 6, 8, 14, 19]. A monitorização de fendas deve ser efectuada a longo prazo, para possibilitar uma correcta interpretação dos resultados. Por vezes, em edifícios históricos, a monitorização é mesmo efectuada durante décadas.



Fig. 4.6 – Fissurómetro aplicado numa parede

Pode ainda ser utilizada outra técnica para verificar a estabilização das fendas. Esta consiste na colocação de um testemunho (elemento) em gesso, na fenda, com a data em que foi assente, fig. 4.7. Uma vez que o gesso resiste às variações sazonais de temperatura, permite identificar a estabilidade da fenda. Se esta aumentar, vai ocorrer a fissuração do gesso.



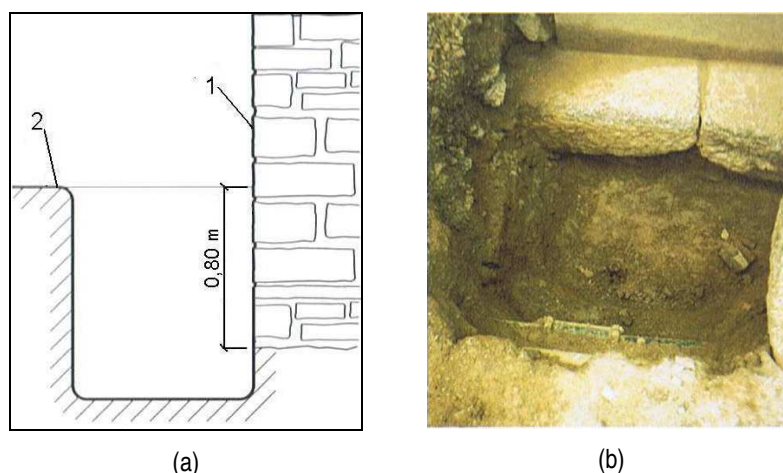
Fig. 4.7 – Testemunho em gesso [29]

A monitorização das fendas pode ainda ser complementada com ensaios dinâmicos pela avaliação da evolução dos danos, uma vez que as eventuais alterações das propriedades físicas da estrutura irão provocar mudanças nos parâmetros modais (como as frequências próprias e os modos de vibração, etc.) [2, 4, 5, 6, 8, 14, 19].

4.6 – DEFINIÇÃO DOS ENSAIOS A REALIZAR

Os ensaios de diagnóstico utilizam-se como complemento da caracterização física e mecânica das paredes e fundações (e dos seus materiais) e também na identificação e calibração de relações constitutivas³ a usar nos modelos estruturais [2, 6].

Ao nível das **fundações**, executam-se os poços de sondagens, fig. 4.8. Estes poços, que devem ser entivados, no caso de haver a necessidade de suportar o terreno aquando da escavação, permitem uma observação visual das características dos materiais, recolha de amostras (para eventual caracterização física, química e mecânica em laboratório) e medição de fissuras ou assentamentos [6, 43].



1 – parede resistente; 2 – terreno

(a) representação esquemática de um poço de reconhecimento; (b) imagem de um poço de reconhecimento

Fig. 4.8 – Poço de reconhecimento (adaptado de [14])

Ao **nível das paredes**, existem diversos ensaios de diagnóstico, que se podem classificar em não-destrutivos, semi-destrutivos e destrutivos.

Estes ensaios sintetizam-se na tabela 4.2, segundo a sua classificação e as características que permitem obter.

³ Relação constitutiva é uma relação entre duas grandezas físicas que é própria de um material ou classe de materiais [59]

Tabela 4.2 – Métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos segundo as características que permitem obter (adaptado de [14, 19])

Classificação	Designação do ensaio	Caracterização		
		Física	Química	Mecânica
Não-destrutivos	Termografia	✓		
	Ultra-sons	✓		
	Tomografia sónica	✓		
	Radar de Prospeção Geotécnica (GPR)	✓		
	Estetoscopia	✓		
Semi-destrutivos	Inspeção com câmara boroscópica	✓		
	Humidade superficial (humidímetro)	✓		
	Determinação do teor de humidade	✓		
	Determinação do teor de higroscopicidade	✓		
	Análise semi-quantitativa de sais solúveis	✓		
	Aderência do revestimento ao suporte ⁽¹⁾	✓	✓	✓
	Macacos planos			✓
Destrutivos	Extracção de carotes ⁽²⁾	✓	✓	✓
	Extracção de varões previamente selados			✓

⁽¹⁾ A caracterização física e química é efectuada em laboratório com a amostra recolhida desde que esta não se encontre deteriorada;

⁽²⁾ Permite caracterizar física, química e mecanicamente a amostra através de ensaios laboratoriais desde que esta não esteja deteriorada (o que raramente sucede devido à elevada heterogeneidade e reduzida coesão das paredes de edifícios antigos).

4.6.1 – Ensaio não-destrutivos

Os ensaios não-destrutivos caracterizam-se por não terem uma acção invasiva ou destrutiva no elemento a inspeccionar (paredes, fundações, etc.) e permitem obter alguns parâmetros qualitativos para caracterizar o comportamento dos materiais que os constituem, e até mesmo detectar anomalias ocultas, que só poderiam ser conhecidas através de ensaios mais ou menos destrutivos [2, 6, 8].

Ensaio de termografia

A termografia baseia-se no princípio de que todos os corpos emitem radiação térmica. Pode ser classificada em passiva ou activa. Na termografia passiva, a parede não é submetida a qualquer excitação térmica artificial. Pelo contrário, na termografia activa é efectuada uma estimulação térmica na parede através de projectores de luz ou outros sistemas geradores de calor [19, 32, 35].

O equipamento utilizado para o ensaio termográfico é uma câmara termográfica sensível à radiação infravermelha, fig. 4.9.

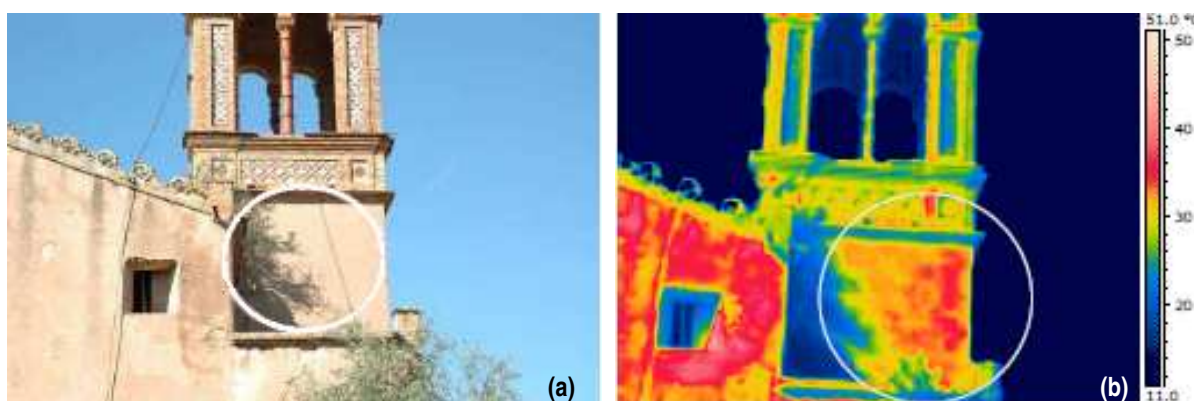


(a) e (b) câmara termográfica; (c) termograma

Fig. 4.9 – Equipamento para o ensaio de termografia

Os termogramas⁴ obtidos podem ser posteriormente tratados em computador de forma a realçar determinados aspectos dos elementos da parede [14, 37].

A termografia permite detectar os vários materiais que constituem as paredes dos edifícios antigos (pedra, tijolo, madeira, ferrolhos metálicos no interior das paredes ou até mesmo redes de tubagens, etc.), quando aquecidos a uma mesma temperatura, fig. 4.10. É possível também a detecção da humidade através do ensaio de termografia, mas apenas em termos qualitativos, isto é, se a parede se encontra seca ou com vários graus de humidade [3, 4, 5, 7, 9, 14, 19, 34, 37, 43].



(a) fotografia; (b) termograma onde se observa a parede de tijolo

Fig. 4.10 – Identificação de uma parede de tijolo sob o revestimento, através do ensaio de termografia [37]

Os principais factores que condicionam o comportamento térmico dos materiais são o calor específico, a condutibilidade térmica e a densidade. As diferenças nestes parâmetros permitem que os materiais absorvam e conduzam o calor de modo diferente, obtendo temperaturas distintas quando sujeitos a uma mesma solicitação térmica. Deste modo, quando é efectuada uma observação de uma parede com elementos de madeira, com uma câmara termográfica, a madeira apresenta uma temperatura mais elevada do que os restantes materiais [3, 5, 7, 9, 14, 37].

⁴ Imagem obtida com a câmara termográfica, na qual se podem observar as diferentes temperaturas dos materiais

Uma desvantagem desta técnica é o facto de apenas permitir a análise superficial da parede, não conseguindo localizar anomalias presentes no seu interior [5].

Ensaio de velocidade de propagação de ultra-sons

O ensaio de ultra-sons consiste na geração de um impulso ultra-sónico num ponto da estrutura, sendo o sinal captado por um receptor noutro ponto. O princípio de funcionamento baseia-se na relação entre a velocidade de propagação dos ultra-sons pelos materiais e as suas características mecânicas, tendo como objectivo medir o tempo (e a velocidade) que os impulsos demoram a percorrer dois pontos na parede, através da expressão:

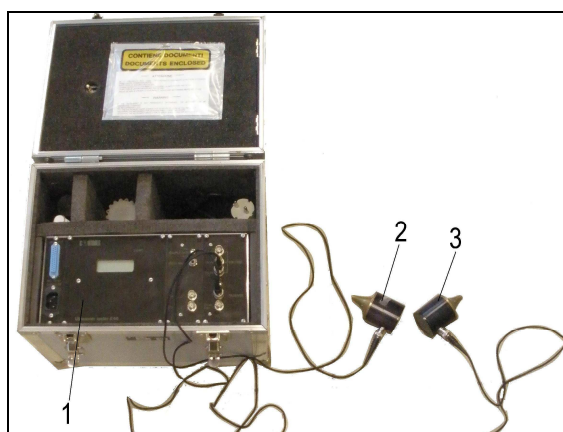
$$v = \frac{\ell}{t} \quad (4.1)$$

em que v é velocidade da ondas ultra-sónicas em [m/s], ℓ é a distância entre os dois pontos, em [m] e t o tempo que as ondas demoram a percorrer a distância ℓ , em [s].

Tratando-se de uma parede bastante heterogênea, com descontinuidades ou vazios, o tempo de propagação aumenta, provocando uma redução significativa da amplitude das ondas [2, 4, 5, 19, 43].

O equipamento para o ensaio ultra-sónico compõe-se de, fig. 4.11:

- painel de controlo;
- conjunto com um transdutor emissor e outro receptor.



1 – Painel de controlo; 2 – transdutor emissor; 3 – transdutor receptor

Fig. 4.11 – Equipamento para ensaio de ultra-sons

Uma vez que a elevada heterogeneidade das paredes dos edifícios antigos dificulta a “passagem” das ondas ultra-sónicas, é muitas vezes utilizado um transmissor mecânico gerador de sinais de baixa frequência (martelo instrumentado) e um acelerómetro para registar o sinal obtido [2, 43]. A principal diferença entre este transmissor mecânico (ensaio sónico) e os transdutores (ensaio ultra-sónico) é a

frequência da onda transmitida. Enquanto que o primeiro transmite com uma frequência entre 20 Hz e 20 KHz, os segundos utilizam frequências entre os 50 KHz e os 10 MHz [19, 54].

O ensaio de ultra-sons pode ser efectuado segundo 3 métodos diferentes [14, 19], conforme esquematizado na fig. 4.12:

- transmissão directa, que consiste na passagem da onda transversalmente à parede, pela colocação do transdutor emissor e do receptor em lados opostos da parede. Os transdutores têm de estar em linha um com o outro. A velocidade é afectada pela qualidade e coerência da secção da parede;
- transmissão semi-directa, em que os transdutores são colocados com um ângulo de 90° entre eles;
- transmissão indirecta, em que os transdutores são colocados no mesmo lado da parede.

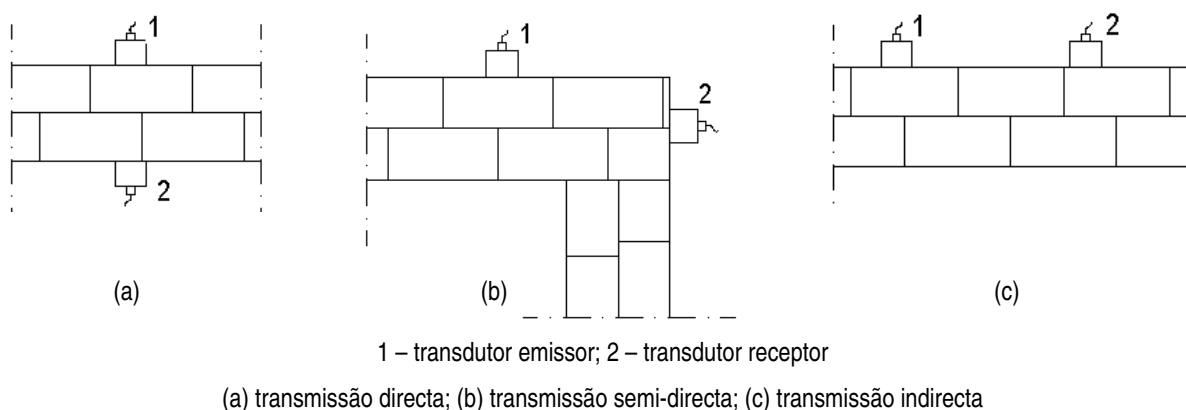


Fig. 4.12 – Representação esquemática dos métodos para o ensaio de ultra-sons (adaptado de [14])

O ensaio de ultra-sons pelo método directo permite detectar heterogeneidades tais como diferentes materiais, vazios e cavidades no interior da alvenaria.

O método semi-directo apenas é utilizado quando não é possível efectuar o ensaio pelo método directo.

O método indirecto é utilizado para a determinação da profundidade de fissuras e a localização de zonas degradadas no interior do revestimento (destacamentos e perdas de coesão) [14, 19].

Ensaio de tomografia sónica

A técnica de ensaio de tomografia sónica é baseada no ensaio de ultra-sons. A principal diferença entre os dois ensaios é a maior complexidade da tomografia na análise e processamento dos dados relativamente ao ensaio de ultra-sons. Esta consiste na transmissão de ondas sónicas aos materiais, em várias direcções, obtendo-se um mapa pormenorizado da distribuição da velocidade do som numa secção plana da estrutura [2, 4, 5, 19, 45, 53, 54].

O equipamento utilizado na execução do ensaio é o seguinte [14, 45, 54]:

- painel de controlo com suporte para tomografia;

- gerador de onda de tensão de baixa frequência (martelo instrumentado ou um impactador calibrado) e acelerómetro receptor.

A tomografia sónica é um método adequado para a obtenção e análise de informações qualitativas no interior da alvenaria, nomeadamente, detecção de diferentes materiais, presença de vazios e cavidades. Este ensaio é ainda muito útil na avaliação da eficácia de injeções de consolidação das paredes de edifícios antigos. Efectuando o ensaio antes e depois da injeção, é possível observar a distribuição da argamassa de injeção (*grout*) e o aumento da velocidade de propagação das ondas (devido à maior homogeneidade provocada pelo *grout*) ao longo da secção [2, 4, 5, 14, 19, 45, 53, 54], fig. 4.13.

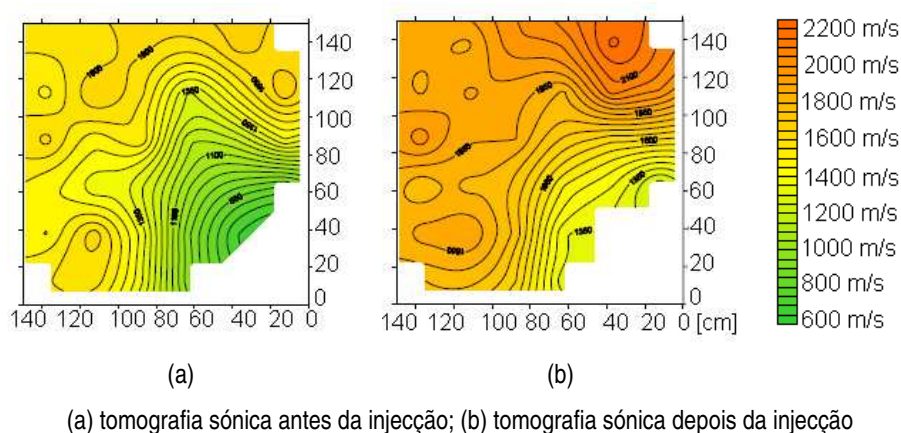


Fig. 4.13 – Tomografia sónica horizontal da secção de uma coluna de alvenaria antes e depois de uma injeção de consolidação [53]

Ensaio de radar de prospecção geotécnica ou GPR (*Ground Penetration Radar*)

O ensaio de radar de prospecção geotécnica é baseado na utilização de ondas electromagnéticas de alta-frequência emitidas através de impulsos curtos. Provém da tecnologia militar e foi inicialmente utilizado na prospecção geológica, mas tem também aplicação no estudo das anomalias em paredes. Esta técnica é essencialmente usada para localizar as superfícies de separação entre materiais, através do contraste entre as suas características dieléctricas⁵. O seu funcionamento consiste na emissão de impulsos electromagnéticos de curta duração e alta voltagem, através de uma antena emissora, e na leitura dos ecos gerados, sendo ambos registados pela antena emissora num traço que equivale à amplitude do sinal em função da profundidade. Este registo sucessivo ao longo da direcção de investigação origina um *radargrama* [2, 20, 21, 48], fig. 4.14.

⁵ Duas características dieléctricas dos materiais são a constante dieléctrica (depende da porosidade, peso, teor de água e da proporção dos seus constituintes) e a condutividade eléctrica (capacidade de um material conduzir corrente eléctrica) [17]

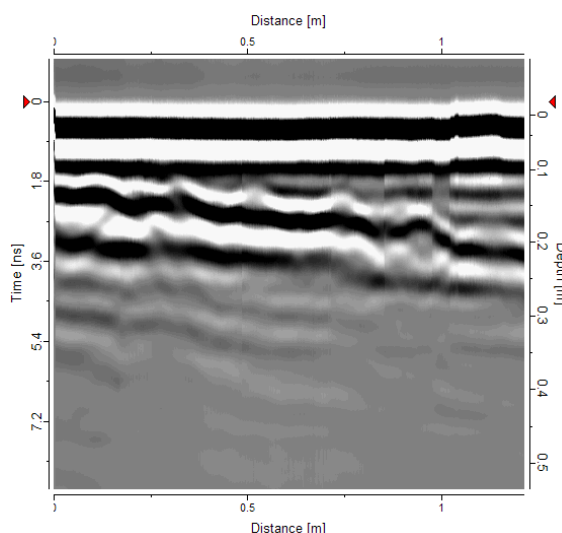


Fig. 4.14 – Exemplo de radargrama

A velocidade de propagação das ondas electromagnéticas e os ecos gerados são dependentes das características dieléctricas dos materiais. Assim, os materiais mais facilmente detectados são os que têm valores muito afastados da constante dieléctrica, pois reflectem maior quantidade de energia [2, 20, 21, 48].

O equipamento utilizado para este ensaio é [20, 21], fig. 4.15:

- unidade de controlo e gerador de sinal;
- uma ou mais antenas, com frequências até 2000 MHz;
- sistema de posicionamento e um computador para configuração dos ensaios, bem como armazenagem, visualização e processamento dos dados em tempo real.



Fig. 4.15 – Equipamento de radar de prospecção geotécnica

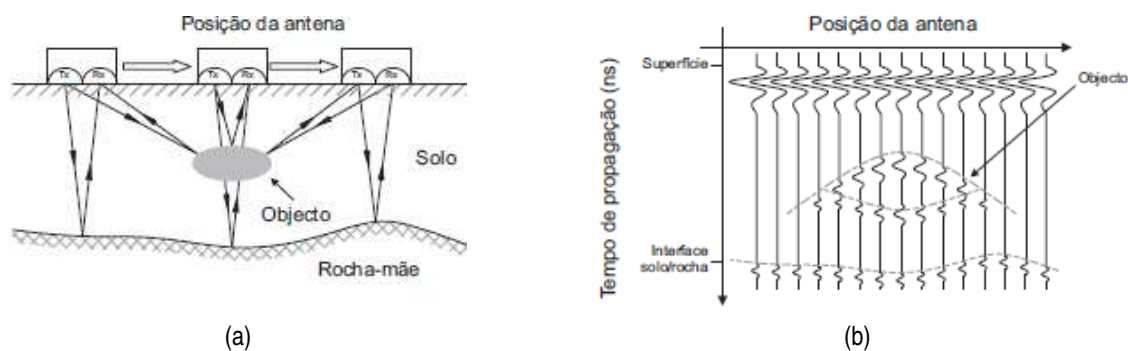
Para a escolha da antena a utilizar, há que ter em conta a profundidade da observação e a precisão requerida, pois estes dois factores estão directamente relacionados com a frequência e o comprimento de onda emitido. Os sinais de baixa frequência atingem maiores profundidades, porque os materiais absorvem mais rapidamente ondas com menor comprimento. Mas ondas com alta-frequência possuem

maior precisão, por terem maior capacidade para diferenciar objectos de pequenas dimensões [2, 3, 5, 7, 17, 19, 20, 48]. Na tabela 4.3 são apresentadas algumas das frequências de antenas mais comuns utilizadas no ensaio de GPR, bem como a sua resolução e alcance.

Tabela 4.3 – Alcance e resolução nas frequências de antenas mais comuns no ensaio de radar (adaptado de [17])

Frequência Central (MHz)	Alcance (m)	Resolução	Utilização Usual
100	5 a 20	Baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Geotecnia • Minas
250	2 a 7	Média/baixa	<ul style="list-style-type: none"> • Geotecnia • Infra-estruturas
800	0,5 a 2	Média/alta	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos estruturais • Pavimentos
1600	< 0,5	Alta	

O radar pode ser configurado de diversas formas, consoante a finalidade do estudo. O mais utilizado e que soluciona a maioria das situações é o modo de reflexão, permitindo detectar alterações ou defeitos nos materiais das paredes, fig. 4.16.



(a) metodologia de aquisição; (b) representação esquemática do radargrama resultante

Fig. 4.16 – Aquisição de dados no terreno com o GPR, em modo de reflexão [17, 19, 20]

O ensaio de radar permite a detecção de fendas, vazios, cavidades, tubagens e diferentes materiais (bem como a sua espessura) no interior das paredes de edifícios antigos. É necessário, no entanto, ter algum cuidado e confirmar o diagnóstico através de outros ensaios (por ex: termografia, tomografia sónica, boroscopia ou carotagens) devido à elevada heterogeneidade destas paredes e à eventual presença de humidade, que poderá adulterar os valores obtidos (como a espessura do elemento e a sua distância à superfície). Contudo, é possível avaliar qualitativamente a presença de humidade, através da diminuição da velocidade de propagação das ondas (devendo ser conhecida a espessura do elemento em estudo) e da diminuição da amplitude do sinal. Assim, se uma parede estiver saturada, o tempo de leitura aumenta, comparativamente ao tempo de leitura de uma parede seca [2, 3, 7, 19, 20, 48].

Ensaio de estetoscopia

O ensaio de estetoscopia é útil para diferenciar a presença de diferentes materiais numa parede de alvenaria e averiguar se o revestimento se encontra separado do suporte.

Neste método é utilizado:

- um estetoscópio;
- um martelo de geólogo (fig. 4.1 a).

Auscultando a parede com o estetoscópio e à medida que se vai percutindo com o martelo é possível, com base no tipo de ressonância ouvida, identificar a madeira ou a alvenaria no interior da parede mista (parede de alvenaria e madeira) [12, 19, 43, 47].

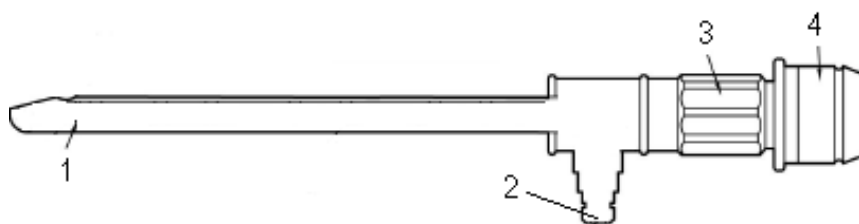
4.6.2 – Ensaios semi-destrutivos

Os ensaios semi-destrutivos criam algumas perturbações nos elementos, nomeadamente ligeira destruição das alvenarias (pequenos rasgos ou orifícios), mas permitem dar uma informação mais real e detalhada (relativamente aos ensaios não-destrutivos) do interior das paredes. As acções destrutivas devem ser minimizadas, evitando marcas significativas nas superfícies [2].

Inspecção com câmara boroscópica

A inspecção com câmara boroscópica é uma técnica baseada na utilização de um instrumento óptico, de uma forma reduzidamente intrusiva. Permite obter informações no interior da parede, como a existência de vazios, descontinuidades, constituição da alvenaria e o seu grau de desagregação.

O equipamento utilizado neste ensaio é uma haste estreita, tendo numa das extremidades, uma ocular e na outra uma objectiva [14, 19, 43], fig. 4.17.



1 – objectiva; 2 – ligação para iluminação; 3 – sistema de focagem; 4 – ocular e ligação para acessórios;

Fig. 4.17 – Representação esquemática de haste boroscópica (adaptado de [14])

A fim de facilitar a iluminação do orifício, pode ser utilizado um sistema óptico com feixe de luz, montado no interior da haste. É possível ainda ligar, com adaptadores, uma máquina fotográfica ou câmara de filmar, registando deste modo imagens do interior dos elementos em análise [14, 19, 43], fig. 4.18.



(a) observação do interior da parede com câmara boroscópica [47]; (b) exemplo de imagem do interior da parede [45]

Fig. 4.18 – Inspecção com câmara boroscópica

Para a execução do ensaio de boroscopia, são necessários furos com diâmetros de cerca de 12 mm e com uma profundidade suficiente, para que seja possível observar o interior da parede. Caso já existam fendas ou folgas nas juntas, devem ser utilizadas prioritariamente para efectuar o ensaio, pois reduzem o grau de destruição do paramento [14, 19, 43].

Medição da humidade superficial de uma parede com humidímetro

A presença de humidade no interior das paredes dos edifícios antigos pode originar ou agravar algumas anomalias já referidas no capítulo anterior. Deste modo, para um diagnóstico qualitativo da humidade superficial de uma parede, pode ser utilizado um instrumento portátil, humidímetro, fig. 4.19.



Fig. 4.19 – Medição de humidade superficial de uma parede com humidímetro [14]

Este aparelho electrónico é constituído por dois eléctrodos que vão sendo posicionados ao longo da parede segundo uma malha previamente definida. Os eléctrodos devem ter um comprimento adequado para que o revestimento não influencie as leituras obtidas.

A medição da humidade é efectuada através da passagem de uma corrente eléctrica entre os dois eléctrodos. Como a resistência eléctrica de um meio poroso (como as argamassas ou a alvenaria de pedra) varia na razão inversa do teor de água dos seus poros, o humidímetro determina o valor da humidade a partir da resistência eléctrica. Sendo um equipamento fácil e rápido de utilizar, está, no

entanto, sujeito a alguns erros devido à elevada heterogeneidades das paredes de edifícios antigos. Também a presença de sais pode alterar bastante os resultados obtidos. Assim, para estas paredes, deve ser utilizado como método de diagnóstico qualitativo, para verificar se a parede se encontra húmida (leituras perto do máximo da escala) ou seca (leituras próximas do zero) [14, 27].

Ensaio de determinação do teor de humidade de uma parede

Como já referido no Capítulo 3, os problemas de humidade em paredes de edifícios antigos podem ter diversas origens: humidade de precipitação, humidade ascendente do terreno, de condensação ou devido a outras causas acidentais. Para um correcto diagnóstico destas anomalias, é necessário compreender as suas causas [27].

Este ensaio utiliza-se para determinar o teor de água no interior de uma parede, através da pesagem das amostras, após a sua recolha e depois de se proceder à secagem das mesmas [27].

O teor de água ponderal em percentagem referido à massa no estado seco é dado pela expressão [26, 27, 51]:

$$\text{Teor de água (\%)} = \frac{m_{\text{húmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}} \times 100 \quad (4.2)$$

em que, $m_{\text{húmida}}$ é a massa da amostra após a sua recolha na parede, em [g], e m_{seca} é a massa da amostra após secagem, também em [g].

O equipamento utilizado neste ensaio é o seguinte [51], fig. 4.20:

- berbequim de baixa rotação;
- frascos estanques para o transporte das amostras;
- caixas de “Petri” para a colocação das amostras;
- balança de precisão para pesagem das amostras;
- estufa ventilada para a sua secagem.



(a) recolha das amostras numa parede; (b) secagem das amostras em estufa; (c) pesagem das amostras na balança

Fig. 4.20 – Fases do ensaio de determinação do teor de humidade de uma parede

Este método permite que as amostras recolhidas sejam utilizadas para outros ensaios, nomeadamente determinação da higroscopicidade e presença de sais solúveis. Se bem executado, tem uma boa precisão na quantificação do teor de humidade. Contudo, não permite medições *in situ*, e exige aparelhos de laboratório, nomeadamente a estufa e a balança de precisão. [27, 51].

Ensaio de determinação da higroscopicidade numa parede

Como referido no ensaio anterior, após a extracção das amostras, determina-se a sua higroscopicidade, pela diferença de massas em contacto com um dado ambiente e após secagem.

A higroscopicidade traduz-se pela capacidade que os sais existentes numa parede têm de se dissolver ou cristalizar, quando a humidade relativa do ar se encontra acima ou abaixo de 65-75%, respectivamente. Uma variação da humidade relativa do ar acima e abaixo daquele intervalo, pode originar ciclos de dissolução-cristalização, provocando o aparecimento de eflorescências e criptoflorescências, com a consequente degradação dos revestimentos na parede.

Os sais solúveis higroscópicos mais comuns são os cloretos, os nitritos e os nitratos. Os cloretos encontram-se normalmente presentes nas proximidades de zonas marítimas ou em alguns materiais (areia da praia mal lavada). Os nitritos e os nitratos são sais higroscópicos altamente solúveis em água. A sua origem está geralmente ligada a fenómenos de decomposição de material orgânico, podendo indiciar possíveis roturas de canalizações de esgotos ou humidade ascendente do solo [26, 27].

A higroscopicidade do material em percentagem referida à massa no estado seco, em determinado ambiente, é dada pela expressão [26, 27, 50]:

$$\text{Higroscopicidade (\%)} = \frac{m_{cc} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (4.3)$$

em que m_{cc} é a massa da amostra ao fim de 24 horas na câmara condicionada (no ambiente seleccionado), em [g], e m_{seca} é a massa da amostra depois da secagem durante 1 hora na estufa, também em [g].

O equipamento utilizado neste ensaio é [27, 50]:

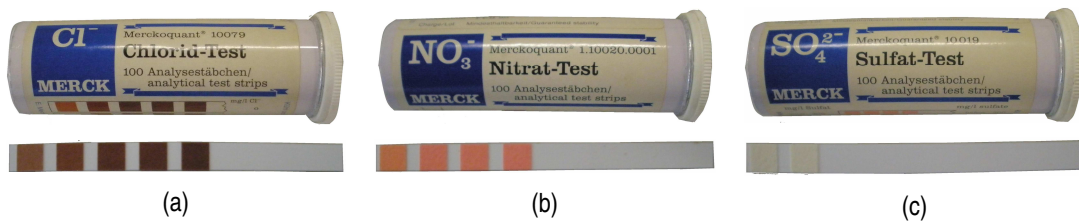
- caixas de “Petri” para colocação das amostras;
- balança de precisão para pesagem das amostras;
- estufa ventilada para a secagem das amostras;
- câmara condicionadora capaz de manter a humidade relativa a um nível constante.

Ensaio de análise semi-quantitativa de sais solúveis numa parede

Este ensaio efectua-se sobre as amostras recolhidas no ensaio de determinação do teor de humidade numa parede e é utilizado para avaliar a existência de sais solúveis (em mg/l), tais como os sulfatos, os cloretos, nitritos e nitratos, através de tiras indicadoras para cada tipo de sais [27, 50].

Os materiais utilizados neste ensaio são [49], fig. 4.21:

- tubos de ensaio para colocação das amostras;
- água destilada para misturar com as amostras;
- acetato de sódio, ácido ascórbico, solução de hidróxido de sódio e ácido nítrico para correcção do pH das amostras;
- medidor de pH;
- tiras de medição;
- solução de ácido sulfâmico para anular a presença de nitritos.



(a) tiras de medição de cloretos; (b) tiras de medição de nitratos; (c) tiras de medição de sulfatos

Fig. 4.21 – Tiras de medição de sais solúveis

Para este ensaio é utilizada a seguinte metodologia [49]:

- retira-se uma porção da amostra em pó e coloca-se num tubo de ensaio;
- adiciona-se água destilada e agita-se o tubo;
- deixa-se a solução em repouso durante uma hora;
- ao fim desse tempo, filtra-se o conteúdo para três tubos de ensaio;
- para a análise dos sulfatos, é utilizada uma das soluções e determina-se o seu pH. Este deve estar entre 4 e 8. Caso não esteja dentro destes valores, é efectuada a sua correcção através da adição de acetato de sódio (para aumentar o pH) ou ácido ascórbico (para diminuir o pH). Por fim, efectua-se a submersão da tira de medição de sulfatos na solução e compara-se a sua coloração com uma tabela de referência, ao fim de 2 minutos;
- para a análise dos cloretos, utiliza-se uma das soluções e determina-se o seu pH, que tem de estar entre 5 e 8. Se este se encontrar acima ou abaixo destes valores adiciona-se hidróxido de sódio (para aumentar o pH) ou ácido nítrico (para diminuir o pH). Finalmente, efectua-se a submersão da tira de medição de cloretos na solução e compara-se a sua coloração com uma tabela de referência, ao fim de 1 minuto;

- para a análise dos nitratos, utiliza-se uma das soluções e determina-se o seu pH (tem de estar entre 1 e 12). Se este estiver acima ou abaixo destes valores adiciona-se acetato de sódio (para aumentar o pH) ou ácido ascórbico (para diminuir o pH). Finalmente, efectua-se a submersão da tira de medição de nitratos na solução e compara-se a sua coloração com uma tabela de referência, ao fim de 1 minuto. Se forem detectados nitritos (pela indicação da tira de medição), estes devem ser anulados através da adição de ácido sulfâmico, repetindo-se de seguida a análise de nitratos.

Ensaio de aderência do revestimento ao suporte

Os revestimentos de paredes dos edifícios antigos devem garantir uma adequada aderência ao suporte durante o seu tempo de vida útil. A ausência de aderência acarreta alguns problemas, nomeadamente, destacamentos (agravados pela acção dos agentes atmosféricos). Os factores que influenciam a aderência dos revestimentos são a natureza do suporte (rugosidade superficial, teor de humidade, etc.) e a constituição do revestimento (materiais, espessura, condições atmosféricas durante a aplicação) [23]. Este ensaio avalia a capacidade de aderência *in situ* do revestimento ao suporte, apresentando diversas vantagens, nomeadamente [23]:

- fácil manuseamento;
- permite obter informação da aderência e da sua perda em condições de serviço;
- resultados de fácil interpretação;
- não necessita de fonte de energia *in situ* nem de trabalho laboratorial;
- permite a recolha das amostras para observação visual ou análise laboratorial.

Contudo, é preciso ter alguma formação específica para proceder à correcta carotagem das superfícies. Outra desvantagem importante é o facto da duração do ensaio ser de 2 ou 3 dias (consoante o tempo de secagem da cola epoxídica) [13, 14, 23, 38].

A tensão de aderência (f_u), em MPa, obtida com o dinamómetro, é dada pela expressão [13, 14, 23, 38]:

$$f_u = \frac{F_u}{A} \quad (4.4)$$

em que F_u é a força de rotura, em [N], e A é a área da pastilha, em [mm²].

O equipamento utilizado na execução do ensaio de aderência do revestimento ao suporte é [13, 14, 23, 38], fig. 4.22:

- rebarbadora ou caroteadora (com o acessório para carotear), consoante as “pastilhas” metálicas sejam de secção quadrada ou circular, respectivamente;
- cola epoxídica para garantir a colagem da “pastilha” metálica ao revestimento;
- dinamómetro para avaliar a tensão de aderência.



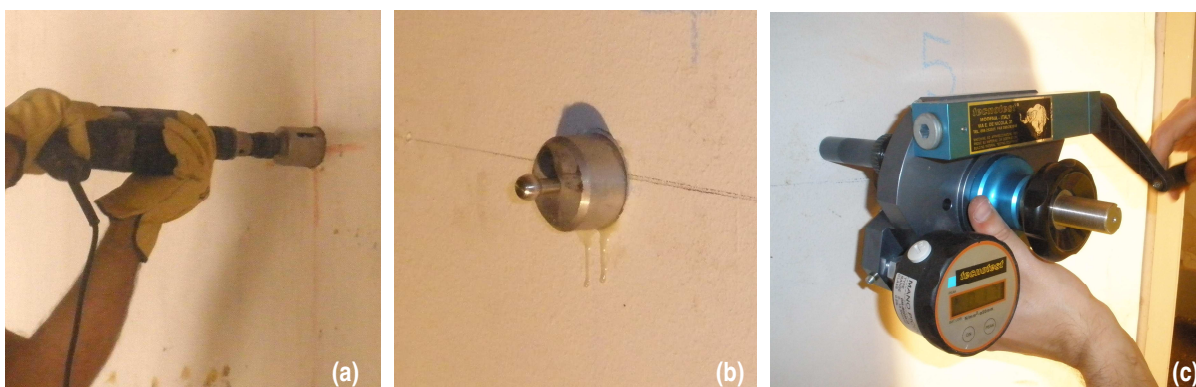
Fig. 4.22 – Dinamómetro

Como já referido, as “pastilhas” metálicas podem ter secção circular ou quadrada. Estas últimas apresentam algumas vantagens relativamente às primeiras, nomeadamente, na execução do rasgo com uma rebarbadora (para fixação das peças de secção quadrada), é apenas efectuada o corte de um dos lados da superfície de cada vez. Desta forma, torna-se mais difícil existirem erros na extracção dos “provetes”.

Para as “pastilhas” metálicas de secção circular, a carotagem da parede é efectuada com a caroteadora, o que origina algumas vibrações no “provete” (pois o rasgo é efectuado simultaneamente em todo o contorno), podendo provocar a sua desagregação ou eventuais erros nos valores da tensão de aderência.

A metodologia do ensaio compõe-se de [13, 14, 23, 38], fig.4.23:

- execução da carote com profundidade superior à espessura do revestimento;
- colagem de uma “pastilha” metálica ao revestimento, com uma cola epoxídica;
- depois da secagem da cola, é efectuada a remoção da “pastilha” com o dinamómetro, registando a tensão de aderência.



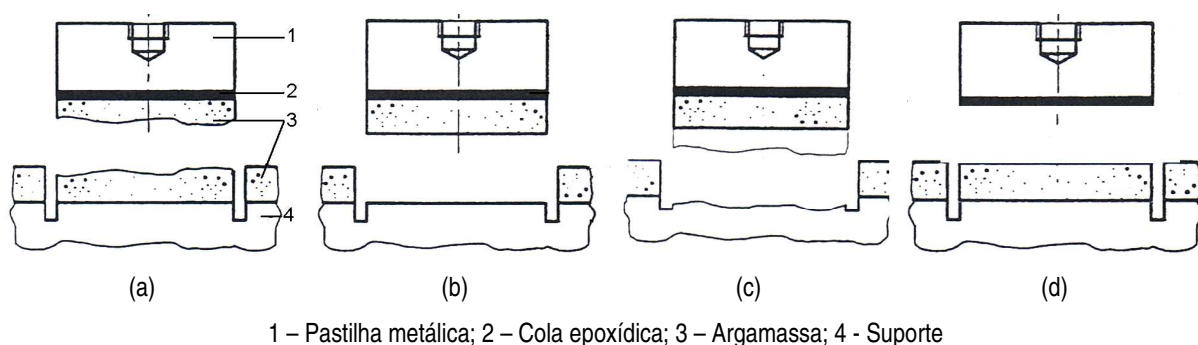
(a) execução da carote com caroteadora; (b) colagem de “pastilha” metálica; (c) extracção da “pastilha” metálica

Fig. 4.23 – Metodologia do ensaio de aderência do revestimento ao suporte

Segundo a norma EN 1015-12 [13], o arrancamento pode ocorrer por, fig. 4.24:

- perda de aderência na interface entre a argamassa (revestimento) e o suporte, rotura adesiva;
- rotura da própria argamassa (revestimento), rotura coesiva na argamassa;
- rotura do suporte, rotura coesiva no suporte.

Na prática, pode ainda ocorrer perda de aderência na interface entre a cola epoxídica e a argamassa, rotura pelo plano de colagem, fig. 4.24 d. Por vezes, a rotura pode dar-se pela combinação de dois dos tipos de rotura referidos anteriormente, rotura mista.



(a) rotura coesiva na argamassa; (b) rotura adesiva; (c) rotura coesiva no suporte; (d) rotura no plano de colagem

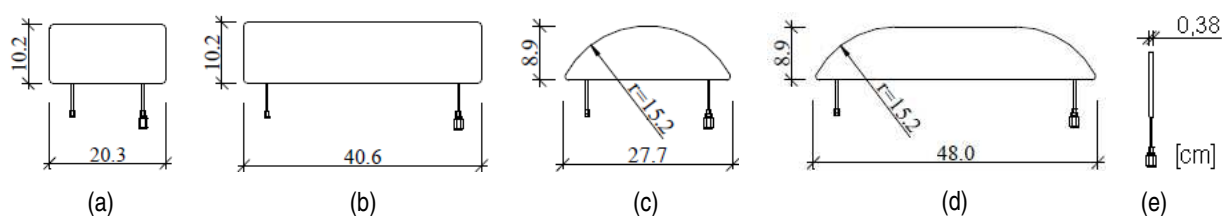
Fig. 4.24 – Representação esquemática dos tipos de rotura no ensaio de aderência do revestimento ao suporte (adaptado de [13])

Ensaio com macacos planos

Este ensaio foi inicialmente desenvolvido para caracterizar estados de tensão em barragens de betão e maciços rochosos, tendo sido posteriormente adaptado à caracterização de alvenarias antigas [14, 24, 47]. O equipamento utilizado neste método consiste em [14, 24, 47]:

- sistema transmissor de pressões, com almofadas de aço finas (macaco plano);
- bomba hidráulica manual;
- tubagem flexível para altas pressões e manómetro de pressões;
- alongâmetro mecânico de milésimos para medir as deformações.
- máquina de corte com disco ou anel diamantado ou máquina de perfuração, para abrir o corte horizontal na parede.

Os macacos podem ter diversas configurações, determinadas pelo tipo de utilização, pelas propriedades da alvenaria em estudo e pela técnica de corte da ranhura, fig. 4.25. Se o corte for executado com uma serra de disco, é usado um macaco com forma circular, mas caso seja efectuado com uma máquina de perfuração, utiliza-se um macaco rectangular. Independentemente do seu formato, o importante é que o macaco plano preencha completamente a ranhura [2, 5, 24].

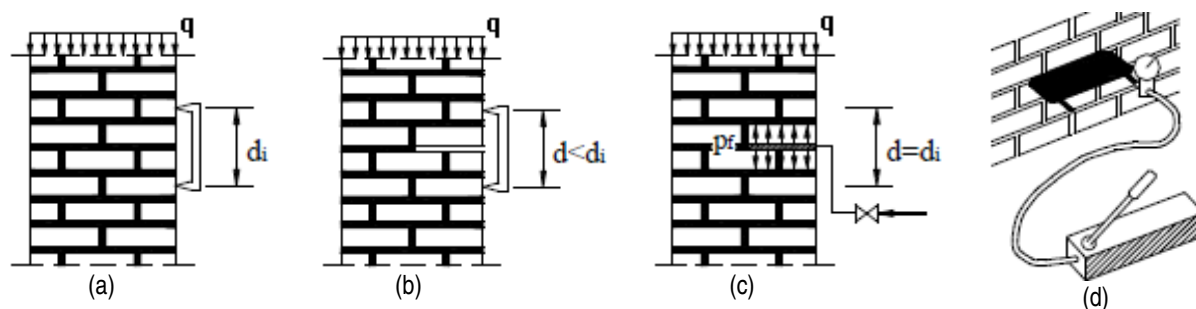


(a) formato rectangular de pequena dimensão ; (b) formato rectangular de maior dimensão; (c) formato semi-circular de pequena dimensão; (d) formato semi-circular de maior dimensão; (e) espessura dos macacos planos

Fig. 4.25 – Representação esquemática de diversas configurações dos macacos planos [24]

Em edifícios antigos, este ensaio utiliza-se para determinar estados de tensão, com macacos planos simples, e estimar a resistência à compressão e o módulo de elasticidade da alvenaria, através do diagrama tensão-deformação, com macacos planos duplos.

No primeiro caso, é executado um corte horizontal na parede e efectuado o registo de distância entre miras. Seguidamente, é aplicada uma pressão uniforme no corte, com a introdução do macaco plano, para anular as deformações nas proximidades da ranhura, fig. 4.26.



(a) registo da distância inicial d_i , entre miras; (b) registo da distância d , entre miras, após abertura do rasgo;
(c) introdução e pressurização, p_f , do macaco plano simples; (d) macaco plano simples no interior da parede

Fig. 4.26 – Representação esquemática das fases do ensaio com macacos planos simples [24]

Quando a distância, d , for igual à distância, d_i , a pressão, p_f , aplicada pelo macaco plano à parede vai ser igual à pressão q (pressão a que a parede se encontra sujeita) [24].

Com os macacos planos duplos, são executados dois rasgos horizontais paralelos, com um determinado afastamento, nos quais são inseridos os macacos planos com uma pressão uniforme, fig. 4.27.

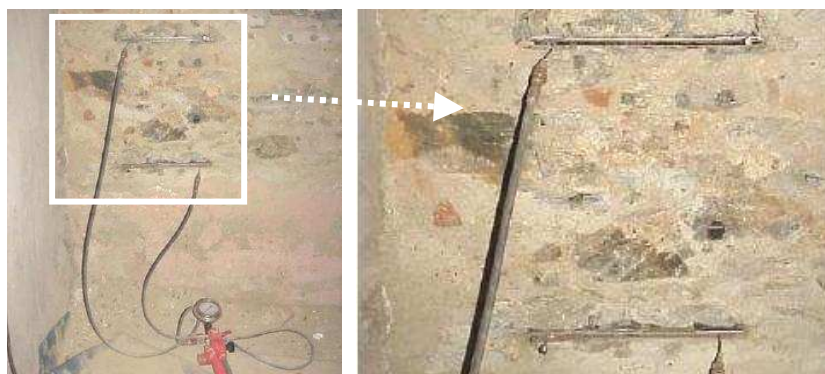


Fig. 4.27 – Ensaio com macacos planos duplos [47]

Desta forma determina-se a capacidade resistente à compressão do “provete” de alvenaria entre os macacos, que se admite sob um estado de tensão nulo (na espessura da parede em que são introduzidos os macacos) antes do ensaio. As deformações verticais deste “provete” são medidas a partir de miras de referência, estimando o módulo de elasticidade através do diagrama de tensões – extensões da parede de alvenaria em estudo [2, 5, 24, 43, 47, 53].

O ensaio com macacos planos é baseado nas seguintes hipóteses [24, 47]:

- o estado de tensão local é de compressão uniforme;
- a alvenaria à volta do corte é homogénea e deforma-se simetricamente em relação a este;
- a tensão aplicada pelos macacos à alvenaria é uniforme;
- os valores de tensão estimados devem, quando comparados com os da resistência à compressão, assegurar que a alvenaria está em regime elástico.

O facto de os rasgos (tanto para os macacos planos simples como para os macacos planos duplos) serem apenas realizados à superfície da parede, faz com que se possa somente efectuar uma caracterização aproximada da alvenaria [24, 43].

Na fig. 4.28 apresentam-se dois exemplos de diagramas de resultados obtidos com o ensaio de macacos planos simples e duplos.

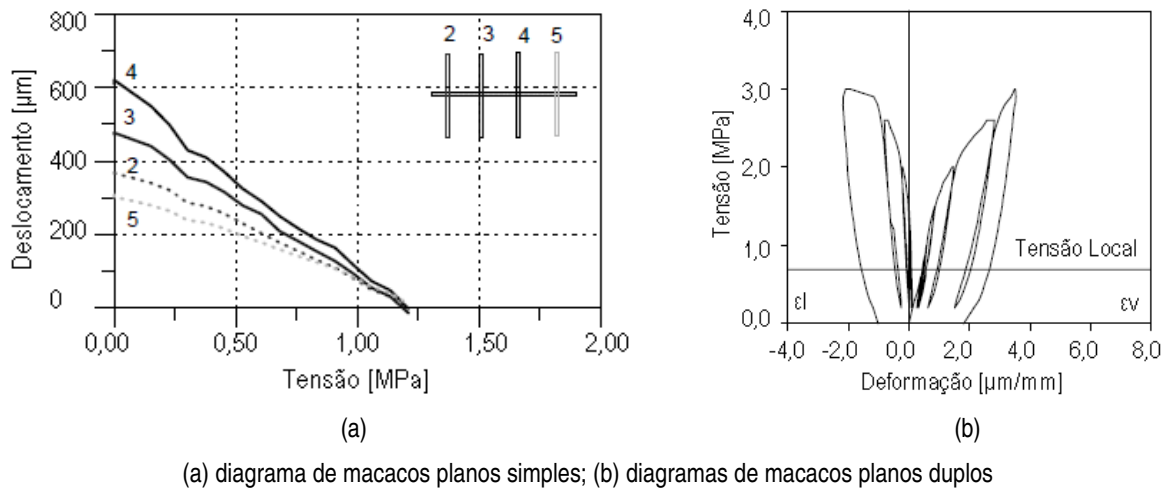


Fig. 4.28 – Exemplo de diagramas de resultados do ensaio de macacos planos (adaptado de [5])

Para calcular os valores de tensão na parede é utilizada a seguinte expressão [24, 47]:

$$\sigma = K_m \times K_a \times p \quad (4.5)$$

em que, K_m é o factor de calibração que tem em conta a rigidez do macaco plano à deformação e o atrito do sistema hidráulico; K_a é a razão entre a área de contacto do macaco plano e a área do rasgo; e p , a pressão dos macacos planos em [MPa].

O factor de calibração é de extrema importância pois se o macaco plano não tiver calibrado de forma correcta pode levar a erros de medição dos valores da tensão na parede. Teoricamente, a pressão aplicada à alvenaria deveria ser igual à pressão interna do sistema hidráulico. Mas, devido à rigidez do macaco plano à deformação e do atrito do sistema hidráulico, o valor da pressão aplicada à parede é sempre inferior à pressão interna. A fig. 4.29 apresenta a relação entre a pressão interna (no macaco plano) e a pressão externa (aplicada à alvenaria), para um macaco plano real (com perda de pressão) e um eventual macaco plano perfeito (sem perda de pressão). O valor do factor de calibração é normalmente dado pelo fabricante, embora o macaco plano tenha de ser recalibrado, com o uso continuado, e no caso de desenvolver deformações excessivas, durante os ensaios [24].

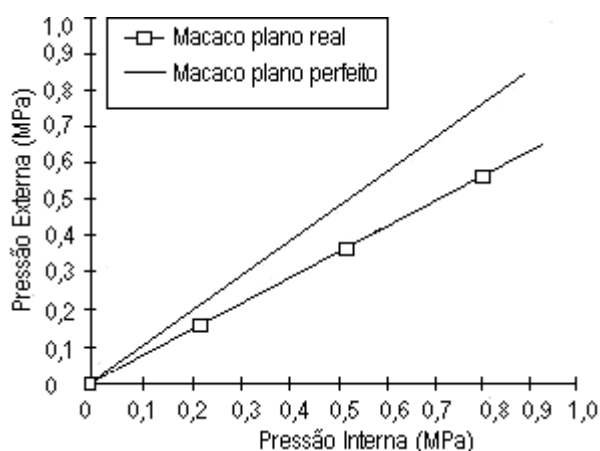


Fig. 4.29– Curva de calibração dos macacos planos (adaptado de [24])

4.6.3 – Ensaio destrutivos

Os ensaios destrutivos, como a extracção de carotes, permitem observar o interior da parede de um edifício antigo. No entanto, estes ensaios têm uma acção bastante intrusiva na parede, devendo ser evitados tanto quanto possível, nomeadamente em edifícios ou monumentos de valor histórico.

Extracção de amostras (carotes)

Em edifícios antigos com paredes de elevada espessura pode ser útil recorrer à técnica de extracção de carotes para observar directamente o interior da parede, conhecer a sua constituição e efectuar ensaios laboratoriais posteriores.

Para a realização do ensaio utiliza-se uma máquina de corte rotativa provida de coroas, com dentes de diamante. A carotagem deve ser efectuada de modo a minimizar os danos na amostra.

No entanto, na maior parte dos casos, devido à elevada heterogeneidade e reduzida coesão das paredes de edifícios antigos, a carote acaba mesmo por sofrer deterioração e desagregação, inviabilizando a aplicação desta técnica [2, 4, 5, 43, 47].

Através da extracção de carotes em alguns pontos da parede, é possível (por ensaios laboratoriais) [2, 4, 5, 43, 47]:

- caracterizar a composição da alvenaria (% vazios e % de cada material constituinte)
- caracterizar os seus materiais constituintes, do ponto de vista físico, químico, mineralógico e mecânico;
- estimar a resistência à compressão da alvenaria. Contudo o resultado não pode ser generalizado para o resto do edifício, devido ao carácter heterogéneo destas paredes.

Na figura fig. 4.30 representa-se uma carote de uma parede de 3 panos com o núcleo de alvenaria de pedra de pior qualidade, e pedra aparelhada nos paramentos exteriores (igreja em Itália).

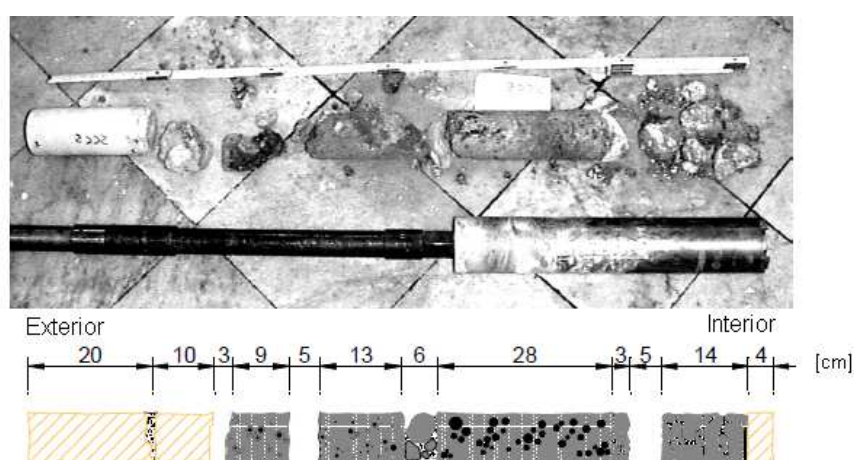


Fig. 4.30 – Carote de uma parede de alvenaria de pedra de 3 panos (adaptado de [4, 5])

Arrancamento de varões previamente selados nas paredes

O ensaio de arrancamento de varões previamente selados na alvenaria é normalmente utilizado em situações de pregagem de paredes novas de betão armado às paredes antigas, como no caso de alguns edifícios depois do incêndio do Chiado em 1988, em Lisboa. Os varões são ancorados em orifícios de 3 cm a 4 cm na alvenaria e com alguma inclinação em relação à horizontal (20° a 30°), permitindo a selagem por injeção. De seguida, estes são arrancados da parede, com o auxílio de um macaco conectado às extremidades salientes dos varões, registando-se a força necessária de arrancamento. Para o ensaio ser correctamente executado, e os resultados obtidos serem válidos, há que ter em atenção o modo como os macacos estão apoiados na parede [43].

O ensaio de arrancamento de varões previamente selados na alvenaria [43]:

- avalia a resistência à tracção da sua ligação;
- permite obter uma ideia sobre a sua coesão local, em função da força de arrancamento.

Seguidamente, na tabela 4.4, sintetizam-se os principais métodos de diagnóstico apresentados neste capítulo, segundo as anomalias que permitem detectar.

Tabela 4.4 – Métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos segundo as anomalias que permitem detectar

Método de Diagnóstico	Heterogeneidades e vazios no interior da parede	Fendas e fissuras	Humidade	Destacamentos e perdas de coesão
Ensaio dinâmico ⁽¹⁾				
Termografia	✓	✓ ⁽²⁾	✓	
Ultra-sons	✓	✓		✓
Tomografia sónica	✓	✓		
Radar de Prospecção Geotécnica (GPR)	✓	✓	✓	✓
Estetoscopia	✓			✓
Inspeção com câmara boroscópica	✓	✓ ⁽³⁾		✓
Humidímetro			✓	
Determinação do teor de humidade			✓	
Determinação do teor de higroscopicidade			✓	
Análise de sais solúveis (semi-quantitativa)			✓	
Aderência do revestimento ao suporte ⁽⁴⁾				✓
Macacos planos ⁽⁵⁾				
Extracção de carotes	✓	✓ ⁽⁶⁾		✓
Extracção de varões previamente selados ⁽⁷⁾				✓

⁽¹⁾ Este método não detecta directamente anomalias, mas permite caracterizar e monitorizar o edifício relativamente às solicitações dinâmicas;

⁽²⁾ A termografia permite detectar possíveis fendas e fissuras no interior do revestimento ou da parede;

⁽³⁾ A boroscopia permite detectar fendas fissuras no interior da parede;

⁽⁴⁾ Este ensaio não detecta directamente anomalias, mas permite estimar a aderência da argamassa de reboco ao suporte;

⁽⁵⁾ Este ensaio não detecta directamente anomalias, mas permite determinar o estado de tensão (macacos planos simples), o módulo de elasticidade e resistência mecânica da parede de alvenaria (macacos planos duplos);

⁽⁶⁾ Pela extracção de carotes, é possível detectar fendas e fissuras, tanto na própria carote como no interior da parede;

⁽⁷⁾ Este ensaio não detecta directamente anomalias, mas permite avaliar a resistência à tracção da ligação da alvenaria.

Na tabela 4.5 apresentam-se os principais métodos de diagnóstico segundo a complementaridade existente entre eles.

Tabela 4.5 – Complementaridade dos métodos de diagnóstico de paredes de edifícios antigos [adaptado de 3, 4, 5, 48]

	Ensaio dinâmico	Termografia	Ultra-sons	Tomografia sónica	Radar (GPR)	Estetoscopia	Boroscopia	Humidímetro	Teor de humidade	Teor de higroscopicidade	Análise de sais solúveis	Aderência ao suporte	Macacos planos	Extracção de carotes	Extracção de varões
Ensaio dinâmico															
Termografia					•			•	•						
Ultra-sons					• ⁽¹⁾		• ⁽²⁾						• ⁽³⁾	• ⁽⁴⁾	
Tomografia sónica							• ⁽²⁾						• ⁽³⁾		
Radar (GPR)		•	• ⁽¹⁾				• ⁽²⁾	•	•						
Estetoscopia												•			
Boroscopia			• ⁽²⁾	• ⁽²⁾	• ⁽²⁾									•	
Humidímetro		•			•				•	•	•				
Teor de humidade		•			•			•		•	•				
Teor de higroscopicidade								•	•		•				
Análise de sais solúveis								•	•	•					
Aderência ao suporte						•									
Macacos planos			• ⁽³⁾	• ⁽³⁾											
Extracção de carotes			• ⁽⁴⁾				•								
Extracção de varões															

(1) Pela combinação dos ultra-sons e do radar é possível detectar eficazmente defeitos no interior da parede [48];

(2) O boroscópio permite confirmar defeitos detectados no interior da parede pelos ultra-sons, tomografia sónica ou radar;

(3) Combinando os ultra-sons ou a tomografia sónica com os macacos planos numa parede, é possível estimar as suas características elásticas, nomeadamente, o módulo de elasticidade, pela correlação deste com a velocidade sónica [4];

(4) É possível efectuar o ensaio de ultra-sons na carote extraída para detectar heterogeneidades, embora os resultados não possam ser generalizados para o resto da parede devido ao seu carácter heterogéneo.

Capítulo 5

Exemplos de Aplicação

5.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo descrevem-se os elementos constituintes de um edifício antigo localizado em Lisboa, as suas principais anomalias e aplicam-se alguns ensaios *in situ* e laboratoriais em diversas paredes. Efectuaram-se ensaios de termografia, ultra-sons, determinação do teor de humidade e higroscopicidade de uma parede e aderência ao suporte, com o objectivo de praticar num edifício real alguns dos métodos descritos no capítulo 4. Após esta análise experimental desenvolveu-se uma proposta de boletim de ensaio (anexo I), com base na especificação E345 – LNEC [22], com o intuito de servir de ferramenta de trabalho em fase de diagnóstico. Preencheu-se ainda o boletim de ensaio modelo para os ensaios de termografia e de determinação do teor de humidade de uma parede (indicados nos anexos II e III, respectivamente).

No final desta análise faz-se a discussão dos resultados obtidos com os métodos de diagnóstico utilizados.

5.2 – CARACTERIZAÇÃO DO EDIFÍCIO OBJECTO DO ESTUDO

O edifício onde foram aplicados alguns métodos de diagnóstico descritos na presente dissertação denomina-se Palacete Lusitânia. A fachada nascente situa-se na Rua de São Domingos à Lapa, nº27, fig.5.1, e a fachada sul na Rua do Prior, nº2, em Lisboa.



Fig. 5.1 – Fachada Nascente do Palacete Lusitânia

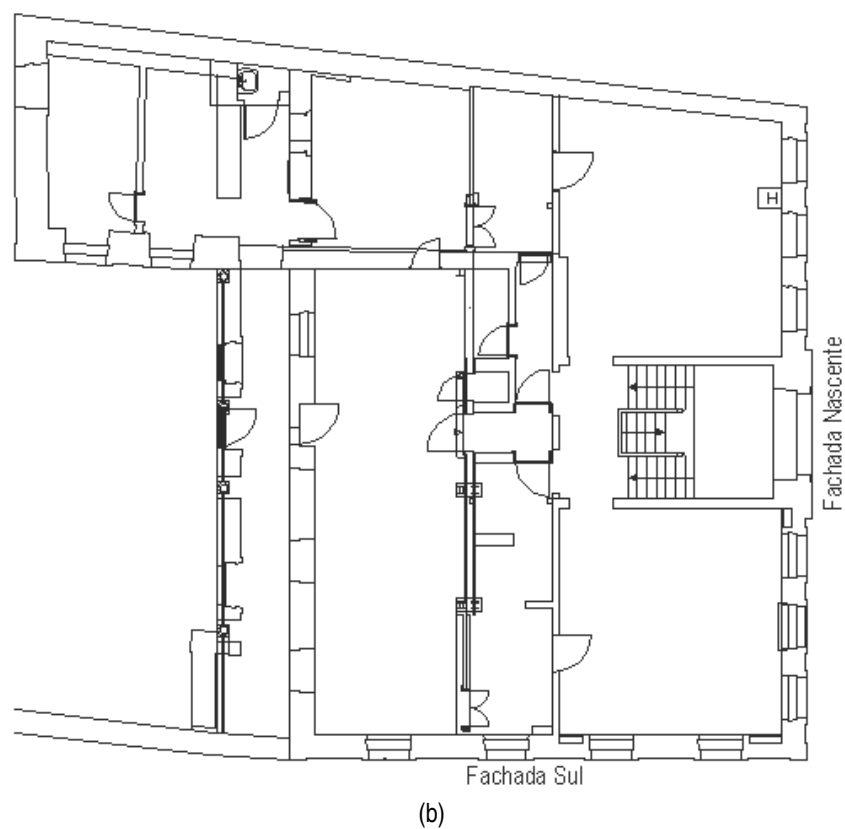
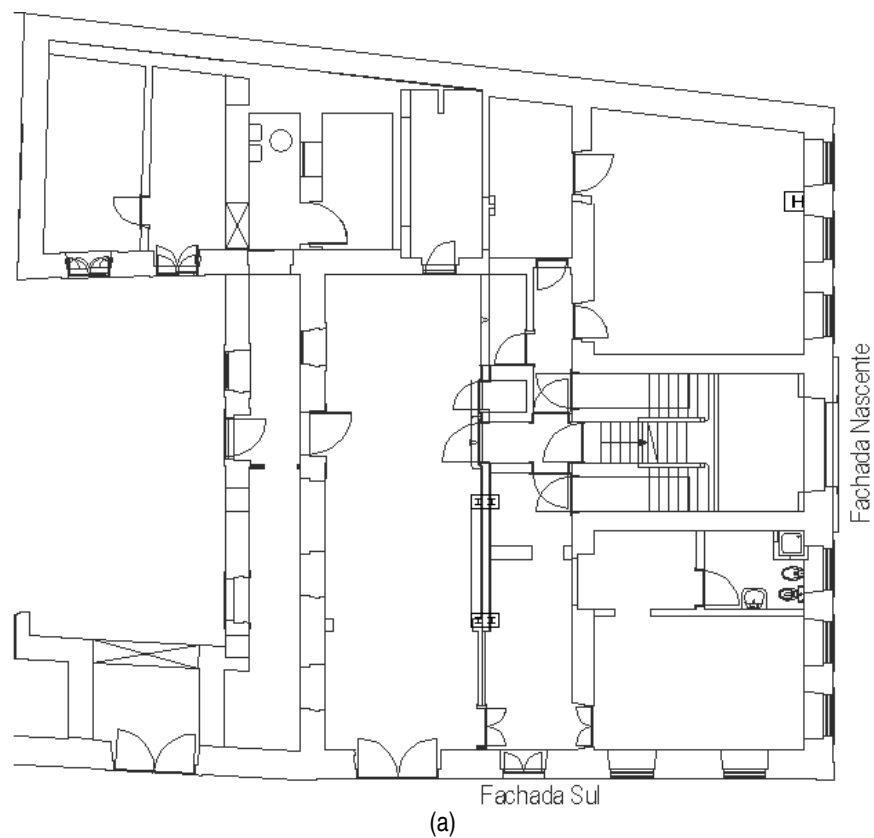
Trata-se de um edifício de habitação Tardo-Pombalino, construído no final do século XIX, com dois “corpos” o qual sofreu alterações posteriores. Em altimetria, um destes “corpos” é composto por três pisos elevados, tendo o outro dois pisos elevados. O edifício apresenta uma área de implantação de aproximadamente 340 m².

Na fig. 5.2 são apresentados os alçados Nascente e Sul do Palacete Lusitânia e na fig. 5.3 as plantas dos pisos -1 e 0, onde foram realizados os ensaios (no caso de estudo).



Fig. 5.2 – Alçados Nascente e Sul do Palacete Lusitânia⁶

⁶ Alçados retirados do projecto de arquitectura de Junho de 2007



(a) Planta do piso -1 do Palacete Lusitânia; (b) Planta do piso 0 do Palacete Lusitânia

Fig. 5.3 – Plantas dos pisos -1 e 0 do Palacete Lusitânia⁷

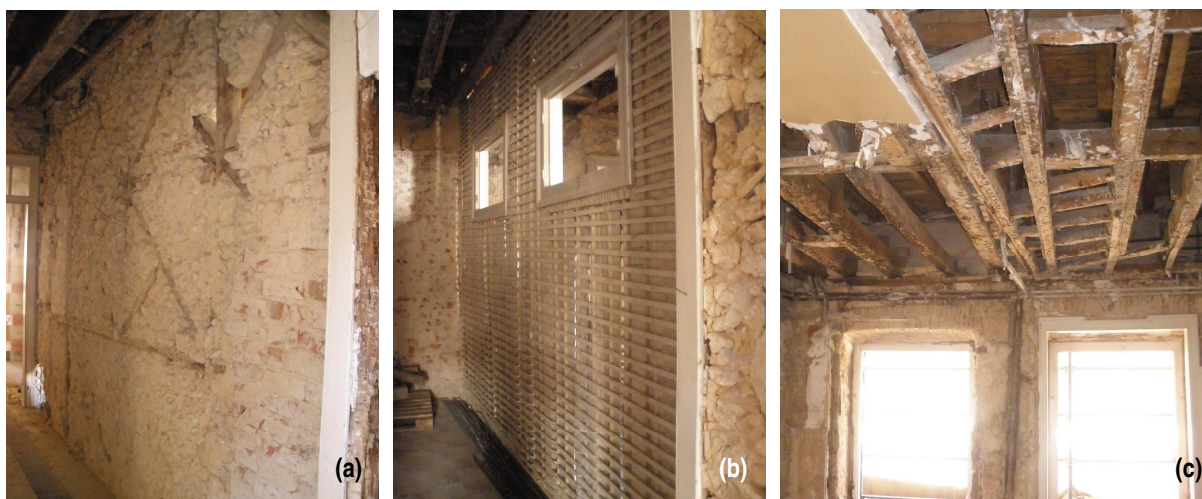
⁷ Plantas retiradas do projecto de arquitectura de Junho de 2007

Nas figuras 5.7 a 5.12 reproduzem-se parte das plantas indicadas na fig. 5.3 com a localização dos elementos ensaiados.

Por observação visual e pela consulta das suas plantas, verifica-se que o edifício é constituído por uma cobertura em estrutura de madeira, paredes exteriores de alvenaria ordinária com cerca de 0,65 m e 0,75 m de espessura e paredes interiores resistentes maioritariamente de frontal em “Cruzes de Santo André” com cerca de 0,25 m de espessura. Contudo, devido a posteriores alterações, existem algumas paredes interiores resistentes em alvenaria de tijolo maciço. As paredes interiores não resistentes (apenas divisórias) são de tabique e têm cerca de 0,15 m de espessura, fig. 5.4.

No “corpo” de três pisos elevados, a estrutura de pavimento é constituída por barrotes de madeira de secção rectangular que apoiam nas paredes resistentes exteriores e interiores, fig. 5.4 c.

No “corpo” de dois pisos elevados, o pavimento é constituído por perfis metálicos de ferro fundido afastados de 0,40 m, onde assentam abobadilhas cerâmicas⁸.



(a) parede de frontal com “Cruz de Santo André” com posterior alteração de tijolo maciço; (b) parede de tabique
(c) pavimento com estrutura de madeira no “corpo” de três pisos elevados

Fig. 5.4 – Soluções construtivas do Palacete Lusitânia

Na data das visitas (de Abril a Julho de 2009), o Palacete Lusitânia estava a ser alvo de uma intervenção de reabilitação e como tal a observação visual do edifício e os ensaios de inspecção e diagnóstico nas paredes foram efectuados quando os trabalhos já estavam avançados (já tinha sido efectuada a remoção dos rebocos de grande parte das paredes e tinham também sido executadas algumas pregagens de paredes de betão armado às de alvenaria ordinária). Deste modo, não foi possível identificar as principais anomalias no edifício, tendo-se recorrido ao projecto de Remodelação/Alterações do Edifício de Outubro de 2007.

⁸ Informação retirada do projecto de Remodelação/Alterações do Edifício de Outubro de 2007

Assim, segundo este projecto, o edifício apresentava um bom estado geral de conservação, não tendo sido detectadas anomalias importantes. Contudo, algumas paredes exteriores e interiores manifestavam vestígios de infiltrações superficiais de água e também alguma fendilhação, que segundo o mesmo projecto, se encontrava estabilizada, fig. 5.5.



(a) e (b) degradação por infiltração de água; (c) e (d) fissuração em paredes

Fig. 5.5 – Algumas anomalias do Palacete Lusitânia ⁹

Também os barrotes de madeira de secção rectangular dos pavimentos (no “corpo” de três pisos elevados) e alguns dos perfis metálicos de ferro fundido (no “corpo” de dois pisos elevados) apresentavam sinais de degradação.

Segundo o projecto de Remediações/Alterações do Edifício de Outubro de 2007, as operações de reabilitação consistiram no reforço da capacidade resistente e controlo da deformabilidade dos pavimentos existentes, devido à alteração de utilização do edifício (de habitação para escritórios).

Como referido anteriormente, os ensaios de diagnóstico foram efectuados em paredes do piso -1 e piso 0. Na fig. 5.6 são apresentadas as plantas parciais destes dois pisos, com a indicação das paredes “ensaiadas” e quais os ensaios efectuados em cada uma delas (representados pelos círculos coloridos).

⁹ Fotografias retiradas do projecto de Remediação/Alterações do Edifício de Outubro de 2007

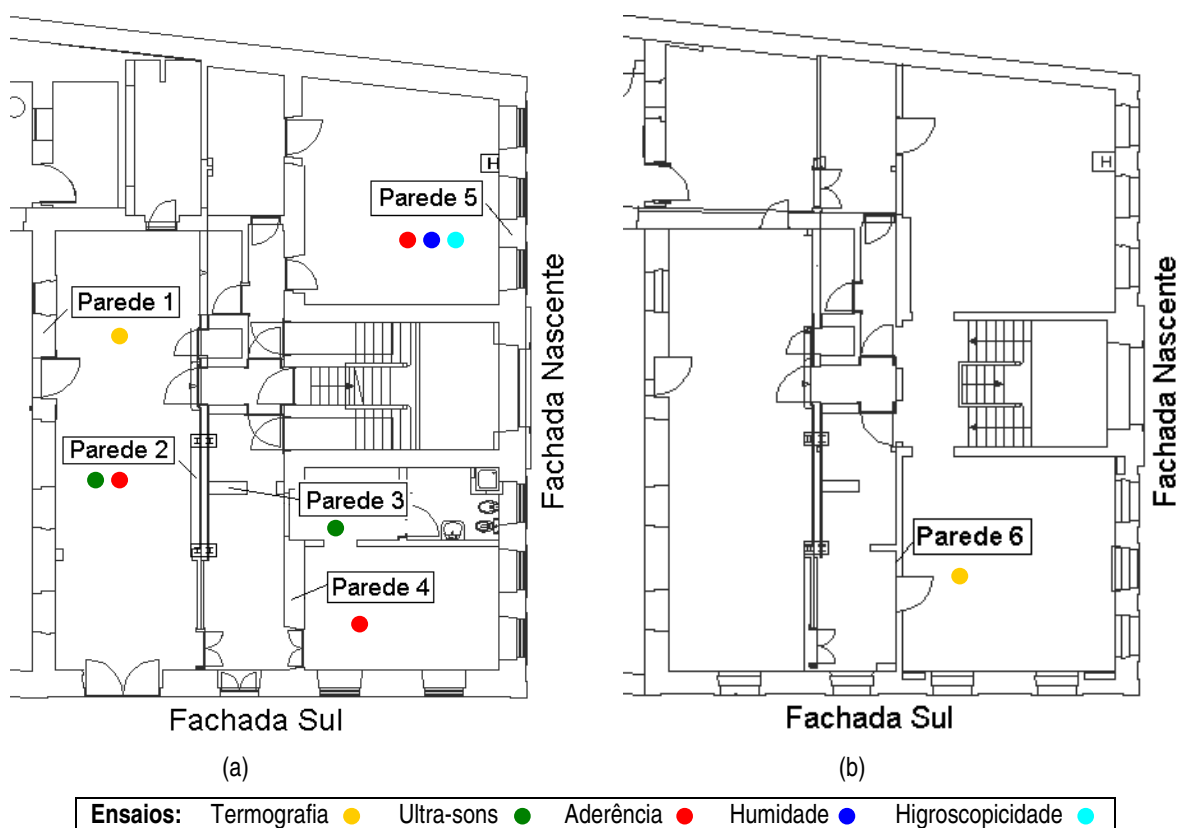


Fig. 5.6 – Plantas parciais do Palacete Lusitânia com a indicação das paredes “ensaiadas” e quais os ensaios efectuados em cada uma delas

A **Parede 1** é uma parede exterior de alvenaria ordinária com 0,65 m de espessura, na qual o reboco já tinha sido removido.

Nesta parede efectuou-se apenas o ensaio de termografia segundo a vista v1, fig. 5.7.

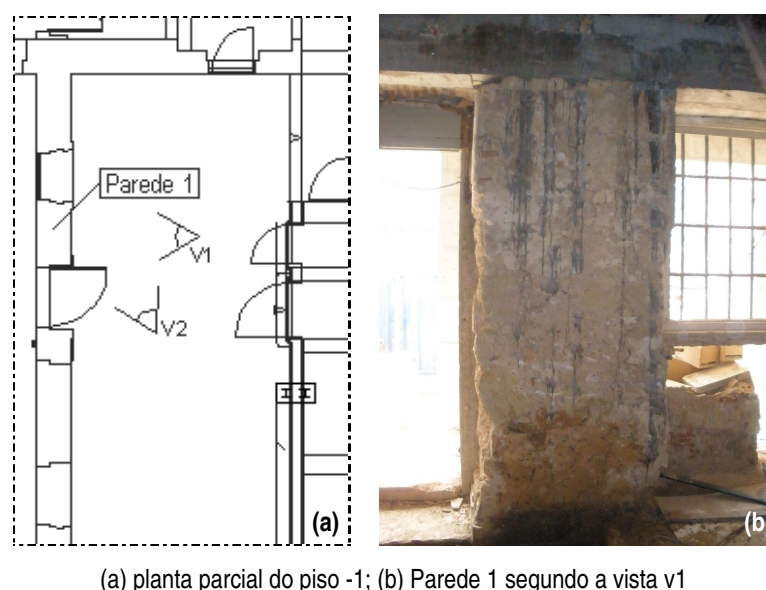
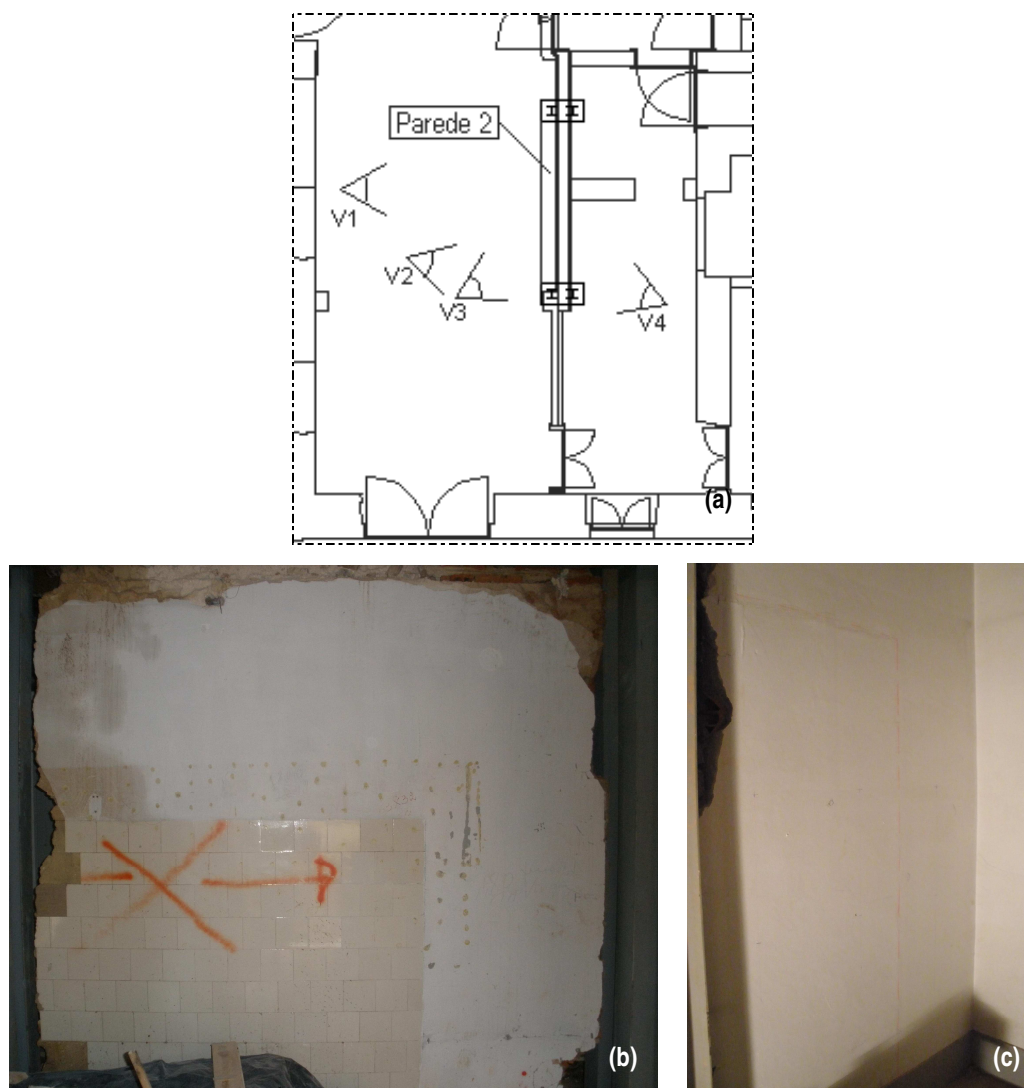


Fig. 5.7 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da Parede 1

A **Parede 2** é uma parede interior resistente de frontal em “Cruz de Santo André” com 0,25 m de espessura e reboco de argamassa de cal aérea e areia estucada. Esta parede foi submetida a alterações posteriores, provavelmente pelo preenchimento de um vão de porta com tijolo maciço e furado e argamassa de cimento.

Nesta parede efectuaram-se dois ensaios, aderência do revestimento ao suporte e ensaio de ultra-sons. Enquanto que o primeiro foi efectuado segundo as vistas v1, v2 e v3, o segundo foi efectuado segundo a vista v4, fig. 5.8.



(a) planta parcial do piso -1; (b) Parede 2 segundo a vista v1; (c) Parede 2 segundo a vista v4

Fig. 5.8 – Planta parcial do piso -1 e imagem das vistas v1 e v4 da Parede 2

Relativamente à **Parede 3**, pela sua espessura (0,35 m) e pela observação das restantes paredes, admite-se que esta tenha a mesma constituição da Parede 1 (alvenaria ordinária). O seu reboco é do tipo do reboco original da Parede 2 (argamassa de cal aérea e areia).

Nesta parede efectuou-se o ensaio de ultra-sons segundo as vistas v1, v2 e v3, fig. 5.9.

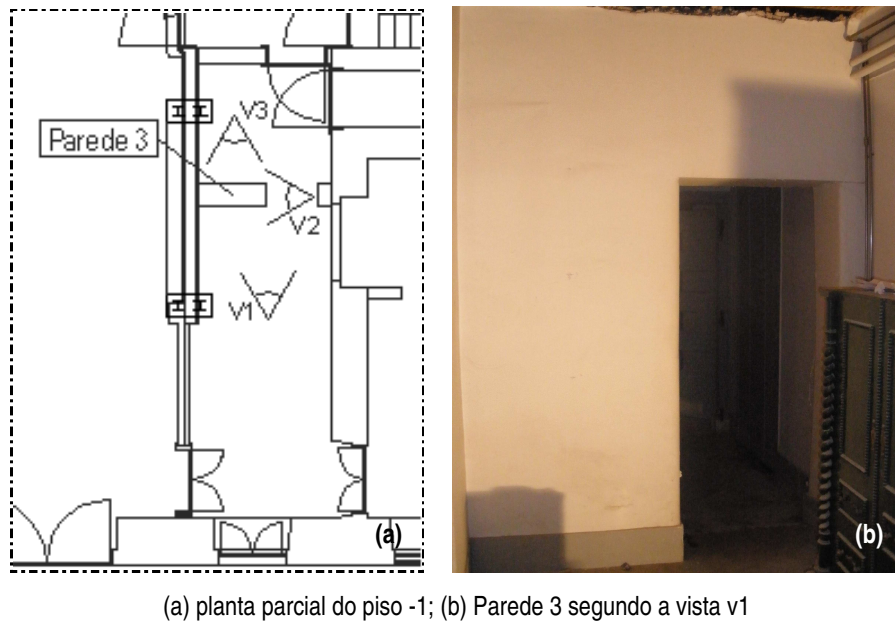


Fig. 5.9 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da Parede 3

A espessura da **Parede 4**, 0,65 m, e a observação dos restantes compartimentos, permite assumir que esta é uma parede de alvenaria ordinária semelhante à Parede 1. O seu reboco é semelhante aos das Paredes 2 e 3. Nesta parede efectuou-se o ensaio de aderência do revestimento ao suporte segundo a vista v1, fig. 5.10.

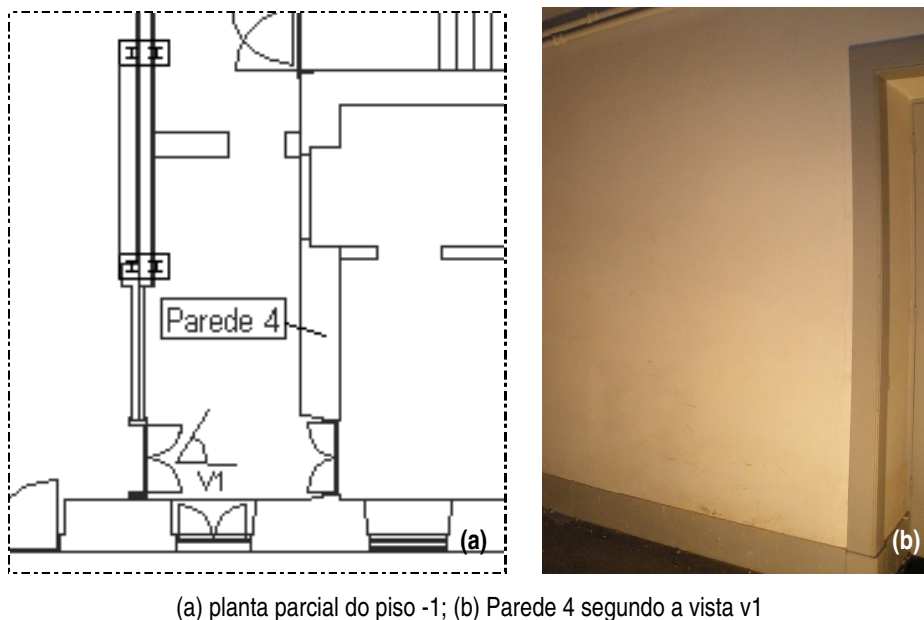
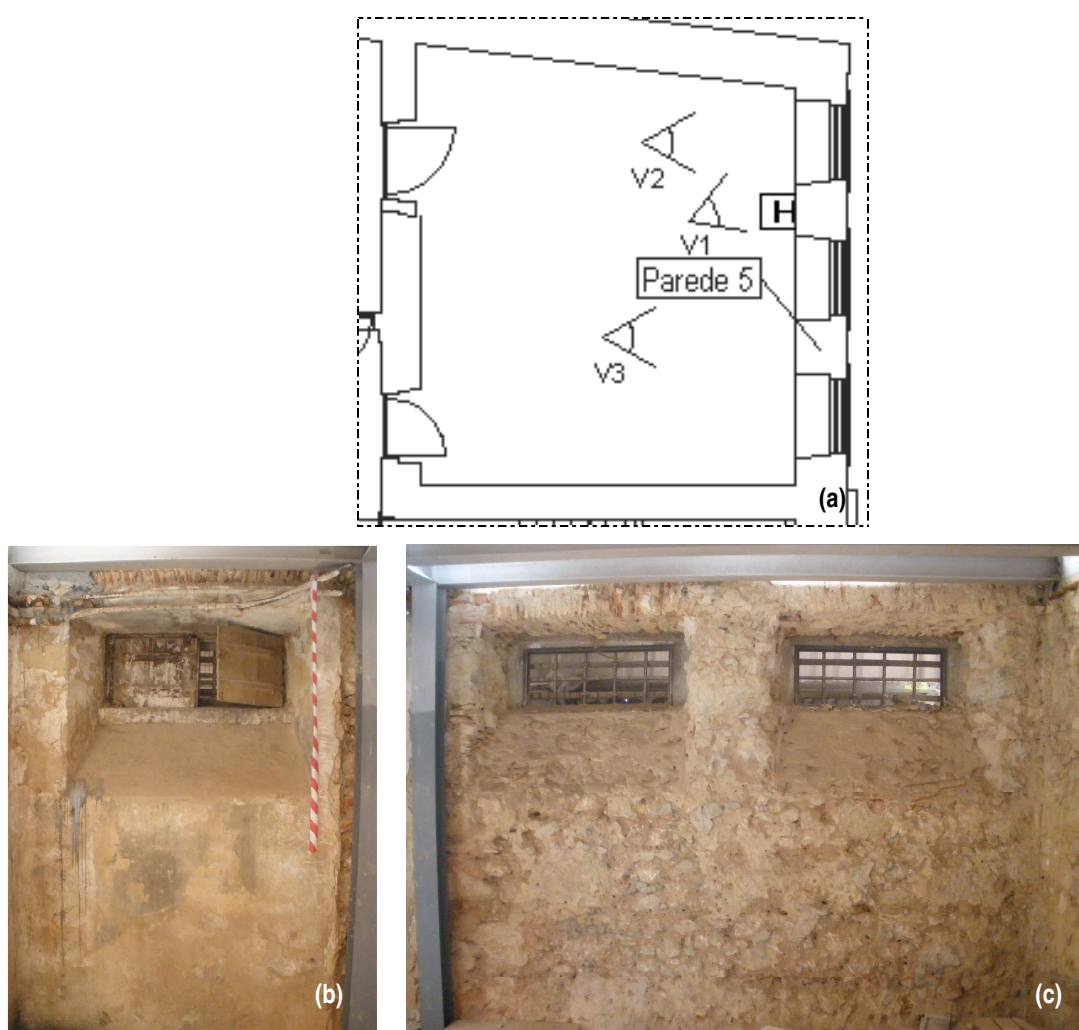


Fig. 5.10 – Planta parcial do piso -1 e imagem da vista v1 da Parede 4

Tal como as Paredes 1, 3 e 4, também a **Parede 5** é constituída por alvenaria ordinária com 0,75 m de espessura. Segundo a vista v1 e v2, esta parede apresenta um reboco que não se desagrega ao tacto, sugerindo ter uma resistência mecânica superior ao de uma argamassa de cal aérea (excluindo a

possibilidade de conter pozolanas¹⁰). Desta forma, admite-se este reboco como sendo de uma argamassa com algum teor de ligante cimentício. Segundo a vista v3, o reboco já tinha sido previamente removido.

Efectuaram-se três ensaios na Parede 5: segundo a vista v1 e v2, efectuou-se o ensaio de aderência do revestimento ao suporte; segundo a vista v3, recolheram-se amostras, para determinação do teor de humidade e higroscopicidade, em laboratório, fig. 5.11.



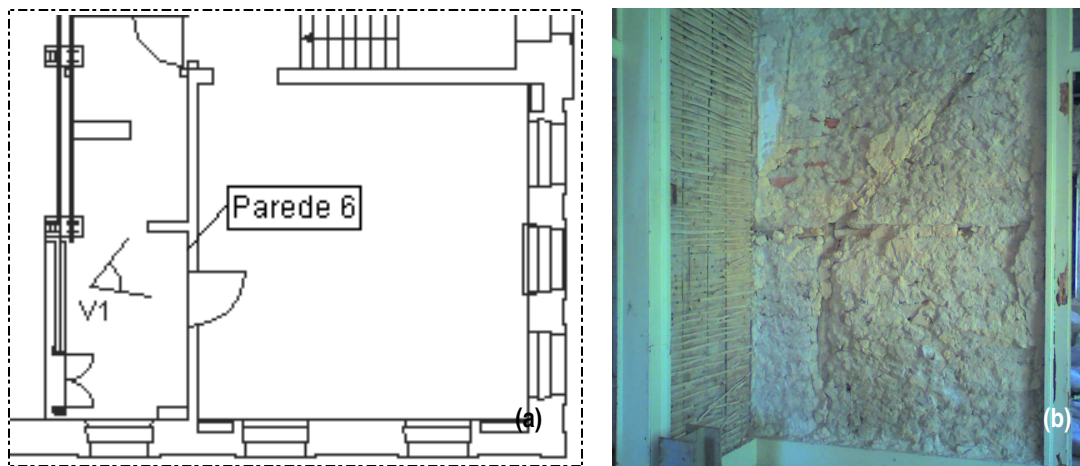
(a) planta parcial do piso -1; (b) Parede 5 segundo a vista v2; (c) Parede 5 segundo a vista v3

Fig. 5.11 – Planta parcial do piso -1 e imagem das vistas v2 e v3 da Parede 5

A **Parede 6** é uma parede interior resistente de frontal¹¹ com 0,20 m de espessura, sem reboco, na qual foi efectuado o ensaio de termografia, segundo a vista v1, fig. 5.12.

¹⁰ As pozolanas são produtos naturais ou artificiais que se combinam (na presença de água) com o hidróxido de cálcio da cal, originando compostos muito estáveis na água e com propriedades aglomerantes. A sua adição às argamassas de cal aérea permite melhorar a resistência mecânica destas, sem grande aumento de rigidez [44].

¹¹ Apesar da Parede 6 apresentar no seu interior elementos de madeira que sugerem uma “Cruz de Santo André”, esta não se encontra perfeitamente definida.



(a) planta parcial do piso 0; (b) Parede 6 segundo a vista v1

Fig. 5.12 – Planta parcial do piso 0 e imagem da vista v1 da Parede 6

Na tabela 5.1 apresenta-se um resumo com a constituição das paredes estudadas anteriormente, bem como o tipo de ensaio realizado em cada uma delas.

Tabela 5.1 – Constituição das paredes estudadas e identificação dos ensaios efectuados

Parede	Vista	Constituição	Espessura (m)	Reboco	Ensaio	
					Efectuado no edifício	Descrito no Cap. 4
1	V1	Alvenaria ordinária	0,65	Sem reboco	Termografia	Pág. 36
	V2					
2	V1	Frontal em “Cruz de Santo André”	0,25	Argamassa de cal aérea e areia estucada	Aderência	Pág. 48
	V2					
	V3			Posterior alteração com tijolo maciço e furado	Argamassa de cimento (posterior)	Ultra-sons
	V4					
3	V1	Alvenaria ordinária	0,35	Argamassa de cal aérea e areia estucada	Ultra-sons	Pág. 38
	V2					
	V3					
4	V1	Alvenaria ordinária	0,65	Argamassa de cal aérea e areia estucada	Aderência	Pág. 48
5	V1	Alvenaria ordinária	0,75	Argamassa com ligante cimentício	Aderência	Pág. 48
	V2			Sem reboco	Humidade e Higroscopicidade	Págs. 45 e 46
	V3					
6	V1	Frontal em “Cruz de Santo André”	0,20	Sem reboco	Termografia	Pág. 36

5.3 – ENSAIO DE TERMOGRAFIA

Como referido no Capítulo 4 (pág. 36), a termografia permite observar possíveis defeitos, vazios e diferentes materiais que constituem a parede, bem como determinar qualitativamente a sua humidade [4, 14, 19, 34, 43]. Neste trabalho, o ensaio de termografia no edifício em estudo teve como objectivo

verificar a humidade da Parede 5 (onde foi efectuado o ensaio do teor de humidade), bem como captar alguns termogramas em que pudesse ser visível a constituição interior de algumas paredes do edifício. Devido à indisponibilidade da Parede 5 (a sala encontrava-se vedada devido a trabalhos de demolição), optou-se pela Parede 1. Como esta se encontrava seca, procedeu-se ao seu humedecimento, de modo a poder observar os termogramas antes e depois da parede estar húmida.

Todas as observações foram efectuadas de forma passiva (sem iluminação artificial).

– *Material utilizado no ensaio:*

- câmara termográfica da marca *Flir*, modelo T360, que permite obter fotografias e termogramas, com sensibilidade térmica de $0,07^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ou 2% da leitura da temperatura indicada [58], fig. 5.13.



Fig. 5.13 – Câmara termográfica utilizada no ensaio de termografia

– *Procedimento de ensaio, fig. 5.14:*

- observou-se a Parede 1 com a câmara termográfica antes de proceder ao seu humedecimento;
- humedeceu-se a Parede 1 até cerca de 1 m de altura;
- observou-se a Parede 1 com a câmara termográfica imediatamente após o seu humedecimento;
- observou-se a Parede 1 com a câmara termográfica 10 minutos após o seu humedecimento.

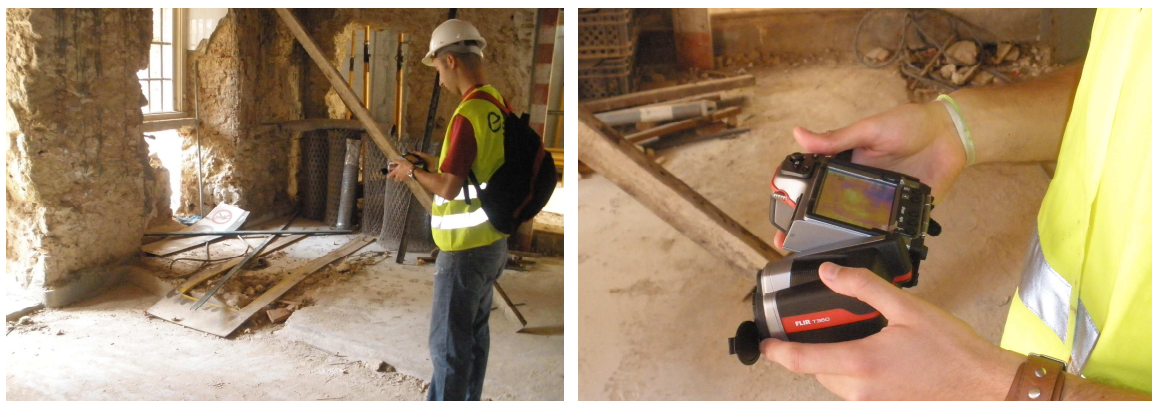
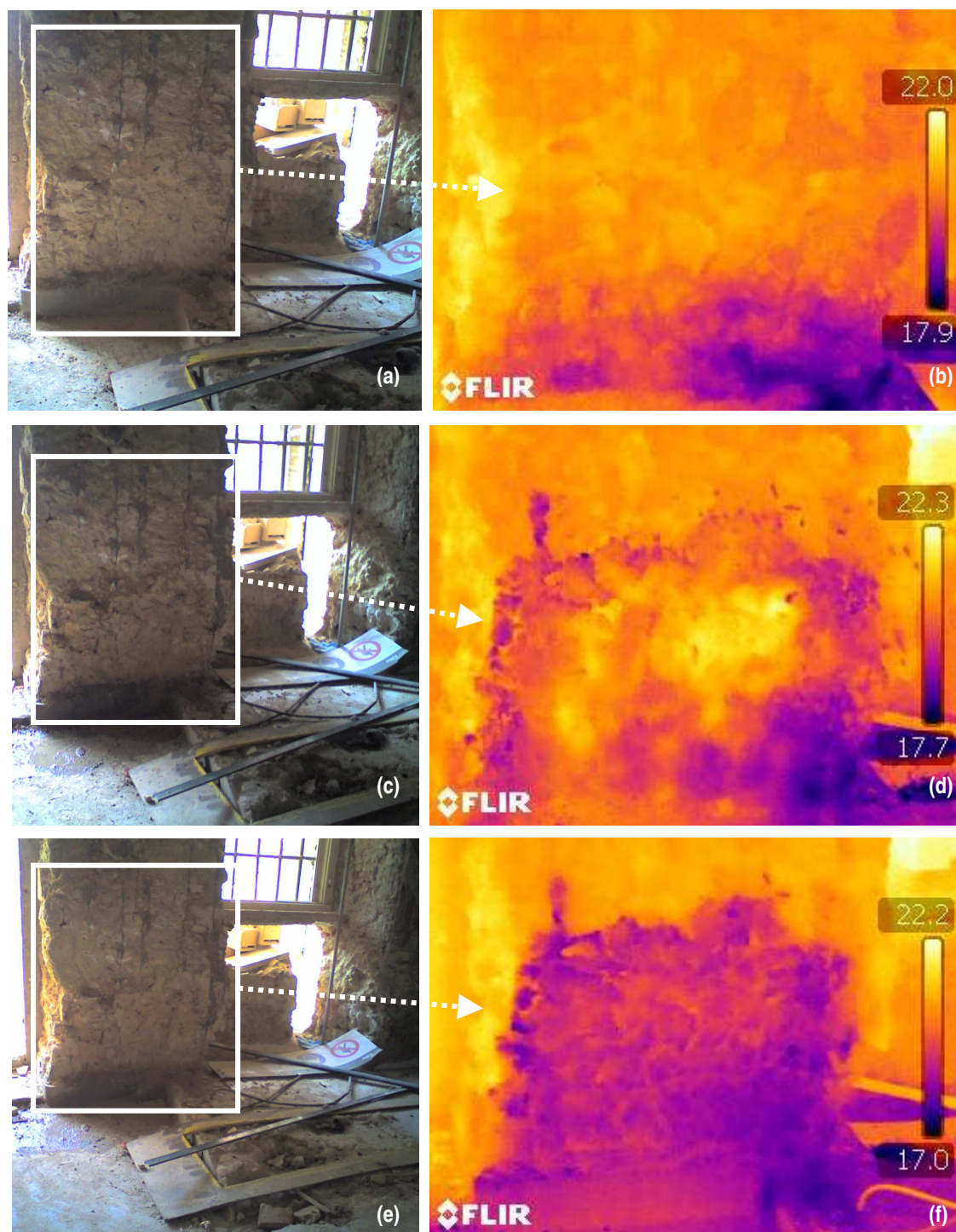


Fig. 5.14 – Ensaio de termografia na Parede 1 – vista v2

– Resultados do ensaio – termogramas:

Na fig. 5.15, são apresentados os termogramas da Parede 1 antes, imediatamente a seguir, e 10 minutos após o seu humedecimento.



(a) e (b) imagens antes do humedecimento da Parede 1 – vista v1;

(c) e (d) imagens imediatamente após o humedecimento da Parede 1 – vista v1;

(e) e (f) imagens 10 minutos após o humedecimento da Parede 1 – vista v1

Fig. 5.15 – Resultados do ensaio de termografia na Parede 1 – vista v1

Foram ainda recolhidos termogramas com outras aplicações da câmara termográfica (observação de heterogeneidades no interior de uma parede). Na fig. 5.16 foram identificados elementos de madeira no interior da Parede 6.



Fig. 5.16– Resultados do ensaio de termografia na Parede 6 – vista v1

Como já referido anteriormente, no final da campanha experimental dos ensaios de termografia e de determinação do teor de humidade foram preenchidos boletins de ensaio (indicados no Anexo II e III, respectivamente), a partir de um modelo de boletim de ensaio (indicado no Anexo I) criado para este trabalho, recorrendo à especificação E345 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil [28]. Foram apenas preenchidas fichas para alguns dos ensaios com o objectivo de servirem de exemplo para a sistematização da informação a incluir no plano de inspecção e ensaio.

5.4 – ENSAIO DE ULTRA-SONS

Como referido no Capítulo 4 (pág. 38), o ensaio de ultra-sons utiliza-se para determinar heterogeneidades, descontinuidades e defeitos no interior da parede e também a presença de fissuras, através da maior ou menor velocidade das ondas ultra-sónicas que atravessam o meio [14, 19]. A velocidade calcula-se pela medição do tempo que estas demoram a percorrer uma distância estabelecida, segundo a expressão 4.1 (pág. 38).

Este ensaio efectuou-se pelos 3 métodos de transmissão: directa, semi-directa e superficial (fig. 4.12).

– *Material utilizado no ensaio:*

- equipamento de ultra-sons, composto por gerador de impulsos, circuito de leitura e transdutores de emissão e recepção, fig. 4.11.
- agente de ligação viscoso para melhorar a transmissão do sinal;
- giz, régua metálica de 1 m, fita métrica de 3 m e fio-de-prumo.

– Procedimento de ensaio [52], fig. 5.17:

- marcou-se uma grelha quadrada na parede com giz, com o auxílio do fio-de-prumo, fita métrica e da régua metálica, com pontos espaçados 0,25 m entre si, na horizontal e na vertical, com comprimento e altura total de 1 m;
- determinou-se o factor de correcção t_0 , que equivale ao tempo medido quando os dois transdutores são colocados directamente em contacto um com o outro;
- utilizou-se o agente de ligação viscoso nos transdutores e iniciou-se o ensaio colocando o transdutor emissor num ponto e o transdutor receptor noutra, de forma a medir o tempo que a onda ultra-sónica demorava a atravessar os dois pontos;
- efectuou-se a medição das velocidades para pontos espaçados 0,25 m e 0,50 m (na direcção horizontal e vertical).



(a) e (b) medição de velocidades na Parede 2 segundo a vista v4; (c) planta parcial do piso -1

Fig. 5.17 – Ensaio de ultra-sons na Parede 2 – vista v4 e planta parcial do piso -1

– Resultados do ensaio de ultra-sons pelos métodos directo e semi-directo:

Na Parede 3 efectuou-se o ensaio de ultra-sons pelos métodos directo e semi-directo (ver pág. 39). No primeiro, colocou-se o transdutor emissor segundo a vista v1 e o transdutor receptor segundo a vista v3, à mesma altura, conforme os pontos representados na fig. 5.18. O método semi-directo foi efectuado de duas formas. Na primeira, colocou-se o transdutor emissor segundo a vista v1 e o receptor segundo a vista v2, à mesma altura. Na segunda forma, colocou-se o transdutor emissor na vista v2 e o receptor segundo a vista v3, também à mesma altura, conforme os pontos representados na fig. 5.18.

Em ambos os métodos não se obteram resultados para a velocidade das ondas ultra-sónicas. As razões da ausência de resultados são analisadas e discutidas na secção 5.9.

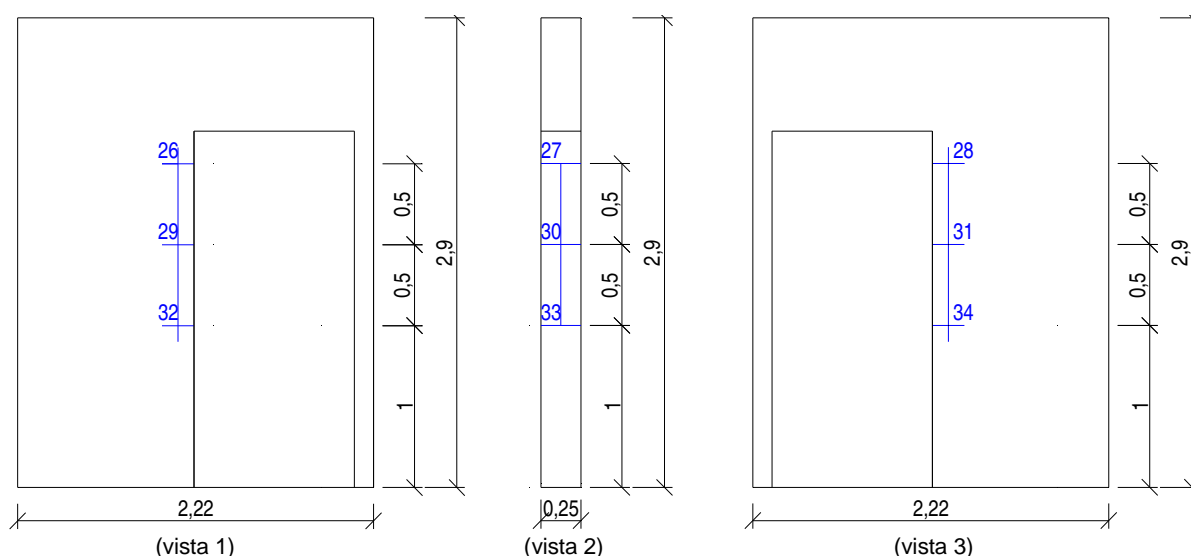
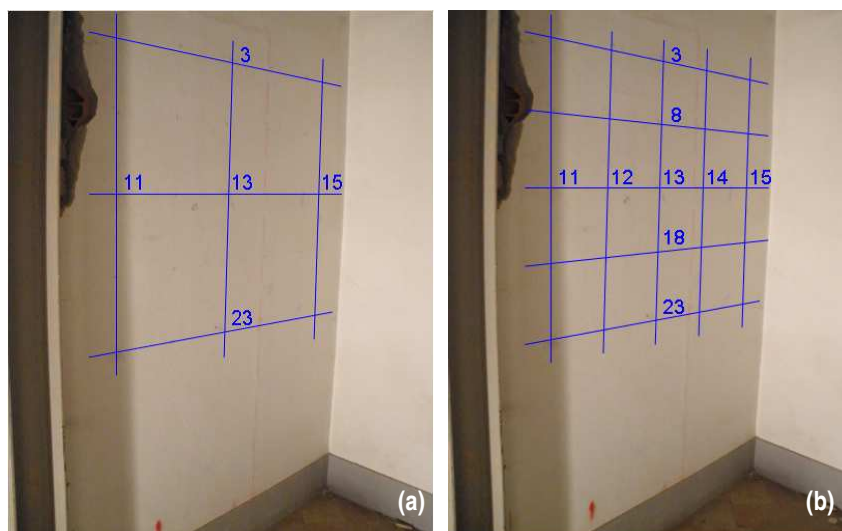


Fig. 5.18 – Representação esquemática das malhas utilizadas no ensaio de ultra-sons pelos métodos directo e semi-directo na Parede 3 segundo as vistas v1, v2 e v3

– *Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto ou superficial:*

O ensaio de ultra-sons pelo método indirecto (ver pág. 39) efectuou-se na Parede 2 segundo a vista v4 (fig. 5.8 c). As distâncias utilizadas entre cada ponto (na direcção horizontal e vertical) foram 0,50 m e 0,25 m, fig. 5.19. O factor de correcção medido foi $t_0 = 1,08 \times 10^{-5}$ s.



(a) malha quadrada de 0,50 m; (b) malha quadrada de 0,25 m

Fig. 5.19 – Malhas no ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na Parede 2 – vista v4

Nas tabelas 5.2 e 5.3 apresentam-se resultados do ensaio de ultra-sons corrigidos com o factor t_0 para a malha quadrada de 0,50 m, nos pontos medidos na direcção horizontal e vertical, respectivamente. Nas tabelas 5.4 e 5.5 indicam-se resultados do ensaio de ultra-sons corrigidos com o factor t_0 para a malha quadrada de 0,25 m, na direcção horizontal e vertical, respectivamente.

Tabela 5.2 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção horizontal, para a malha de 0,50 m

Pontos	Tempo $\times 10^{-4}$ (s)	Velocidade (m/s)
11-13	10,8	467
13-15	6,00	848

Tabela 5.3 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção vertical, para a malha de 0,50 m

Pontos	Tempo $\times 10^{-4}$ (s)	Velocidade (m/s)
3-13	9,57	528
13-23	8,37	605

Tabela 5.4 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção horizontal, para a malha de 0,25 m

Pontos	Tempo $\times 10^{-4}$ (s)	Velocidade (m/s)
11-12	9,67	261
12-13	2,38	1099
13-14	1,71	1558
14-15	2,82	921

Tabela 5.5 – Resultados do ensaio de ultra-sons pelo método indirecto na direcção vertical, para a malha de 0,25 m

Pontos	Tempo $\times 10^{-4}$ (s)	Velocidade (m/s)
3-8	1,66	1615
8-13	2,48	1052
13-18	2,32	1132
18-23	2,64	989

5.5 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

A presença de humidade nas paredes dos edifícios antigos pode conduzir a diversas anomalias, já referidas no Capítulo 3 (pág. 22). Para proceder a um correcto diagnóstico das causas dessas anomalias, pode ser necessário avaliar a distribuição da humidade no interior de uma parede. Este ensaio estima o teor de humidade em percentagem relativamente à massa no estado seco através da diferença de massas de amostras recolhidas na parede, antes e depois da secagem destas em estufa, segundo a expressão 4.2 (pág. 45) [26, 27].

O ensaio realizou-se na Parede 5 segundo a vista v3, na qual se efectuaram 18 furos, 9 a uma profundidade de 10 cm (números ímpares) e outros 9 a uma profundidade de 20 cm (números pares), fig. 5.20. A parede manifestava indícios de humidade, pois observou-se por inspecção visual e pelo tacto que esta se apresentava húmida.

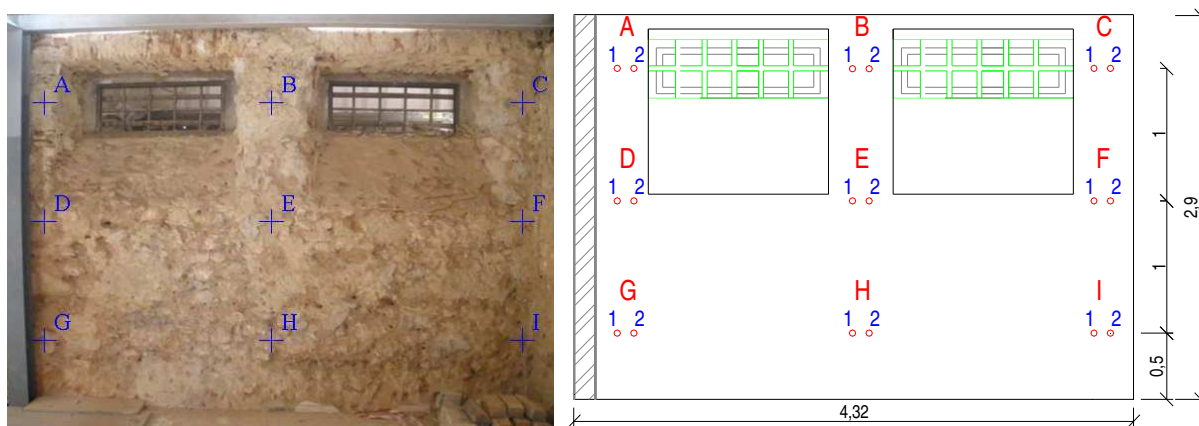


Fig. 5.20 – Localização dos furos na Parede 5 – vista v3

– *Material utilizado no ensaio:*

- frascos de plástico de 50 ml com uma tampa hermética e outra roscada para garantir a estanquidade das amostras recolhidas;
- bolsa térmica para transporte dos frascos depois de recolhidas as amostras;
- berbequim de baixa rotação com bitola;
- termo-higrómetro;
- brocas de 200 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro;
- giz, régua metálica de 1 m, fita métrica de 3 m, fio-de-prumo e escadote;
- balança com precisão de 0,001 g;
- estufa ventilada;
- caixas de “Petri”

– *Procedimento de ensaio [51], fig. 5.21:*

- numeraram-se os frascos e as caixas de “Petri”, procedendo de seguida à pesagem das mesmas;
- registou-se a temperatura e humidade relativa do interior do compartimento da Parede 5, através da colocação do termo-higrómetro no dia anterior, para estabilizar;
- marcaram-se as cotas onde iriam ser executados os furos, com o auxílio do fio-de-prumo, fita métrica e da régua metálica;
- efectuou-se um furo à profundidade de 10 cm, com o berbequim a baixa rotação, e recolheu-se a amostra, colocando o frasco por baixo. Executou-se o segundo furo ao lado do primeiro, a cerca de 20 cm de profundidade, recolhendo-se a amostra do mesmo modo. Foi utilizado o mesmo procedimento para os restantes furos;
- depois de recolhidas todas as amostras, estas foram acondicionadas na bolsa térmica para melhor preservação até à sua pesagem;

- agitou-se o primeiro frasco que continha a primeira amostra, despejou-se o seu conteúdo para a caixa de “Petri”, procedendo de imediato à sua pesagem e registo do valor. Foi efectuado o mesmo procedimento para as restantes amostras;
- seguidamente, colocaram-se as amostras na estufa a 105°C durante 1 hora;
- ao fim de 1 hora, retiraram-se as amostras da estufa e procedeu-se à sua pesagem, uma a uma, registando o seu valor.



(a) termo-higrómetro para medir temperatura e humidade relativa; (b) e (c) execução da furação para recolha das amostras; (d) e (e) pesagem das amostras; (f) registo dos valores da pesagem das amostras

Fig. 5.21 – Ensaio de determinação do teor de humidade na Parede 5 – vista v3

– Resultados da determinação do teor de humidade na Parede 5 segundo a vista v3

No dia em que se realizaram os ensaios, a temperatura mínima do ar exterior era de 21°C, enquanto que a máxima era de 33°C. Segundo o termo-higrómetro, a temperatura no interior do compartimento era de 20,5°C e a humidade relativa era de 78%.

O paramento interior da Parede 5 está orientado para Oeste. Os furos foram executados segundo a fig. 5.20 (apresentada anteriormente), em que a cada uma das letras correspondem dois orifícios, um a 10 cm de profundidade (números ímpares) e outro a 20 cm (números pares).

Os resultados do teor de humidade, relativamente à massa no estado seco a 10 cm de profundidade apresentam-se na tabela 5.6. Para os 20 cm de profundidade apresentam-se na tabela 5.7.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio do teor de humidade para as amostras a 10 cm de profundidade

Nº Amostra	Amostra húmida + Caixa de Petri (g)	Amostra seca + Caixa de Petri (g)	Teor de humidade (%)
A1	27,775	27,684	2,95
B1	35,237	35,133	5,26
C1	33,146	33,138	2,39
D1	32,004	31,968	1,35
E1	31,622	31,551	1,22
F1	27,044	26,947	2,43
G1	32,791	32,617	2,32
H1	16,264	16,063	3,00
I1	21,453	21,000	7,05

Tabela 5.7 – Resultados do ensaio do teor de humidade para as amostras a 20 cm de profundidade

Nº Amostra	Amostra húmida + Caixa de Petri (g)	Amostra seca + Caixa de Petri (g)	Teor de humidade (%)
A2	26,748	26,679	1,93
B2	32,153	32,046	2,72
C2	35,233	34,944	5,43
D2	35,978	35,704	5,45
E2	31,233	31,172	1,02
F2	34,517	34,418	4,31
G2	30,978	30,859	1,49
H2	18,277	18,077	3,57
I2	15,409	15,324	1,03

5.6 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DO TEOR DE HIGROSCOPICIDADE

Com as amostras recolhidas para o ensaio anterior, determinou-se também a higroscopicidade da Parede 5 segundo a vista v3 (fig. 5.20), de acordo com a definição descrita no Capítulo 4 (pág. 46).

A higroscopicidade das amostras, a 20°C e a 85% de humidade relativa (ambiente seleccionado no ensaio), é dada, em percentagem relativamente à massa no estado seco, segundo a expressão 4.3 (pág. 46). Este ensaio permite determinar se os sais que se encontram na parede são ou não higroscópicos, isto é, têm a capacidade de absorver a humidade do ar, dissolvendo-se e cristalizando (com aumento do seu volume) quando a humidade relativa do ar está acima ou abaixo de 65-75 %, respectivamente [26, 27].

Teria sido útil efectuar também uma análise semi-quantitativa dos sais solúveis nas amostras, para averiguar que sais estão presentes na Parede 5 segundo a vista v3. Contudo, tal não foi possível.

– *Material utilizado no ensaio:*

- frascos de plástico de 50 ml com uma tampa hermética e outra roscada;
- câmara condicionadora;

- balança com precisão de 0,001 g;
- estufa ventilada;
- caixas de “Petri”.

– Procedimento de ensaio, fig.5.22 [50]:

- agitou-se o primeiro frasco que continha a primeira amostra e despejou-se o seu conteúdo para a caixa de “Petri”. Foi efectuado o mesmo procedimento para as restantes amostras;
- colocaram-se as amostras na estufa ventilada a 105°C durante 1 hora;
- ao fim de 1 hora, retiraram-se as amostras da estufa ventilada e procedeu-se à sua pesagem, uma a uma, registando o seu valor;
- colocaram-se as amostras na câmara condicionada a 20°C com 85% de humidade relativa durante um ciclo de 24 horas;
- ao fim das 24 horas, retiraram-se as amostras da câmara condicionadora e procedeu-se novamente à sua pesagem, uma a uma, registando o valor.



(a) e (b) estufa ventilada com as amostras no seu interior;

(c) amostras nas caixas de petri; (d) e (e) câmara condicionadora com as amostras no seu interior

Fig. 5.22 – Ensaio de determinação do teor de higroscopicidade nas amostras da Parede 5 – vista v3

– Resultados da determinação da higroscopicidade na Parede 5 segundo a vista v3

Os resultados do teor de higroscopicidade a 20°C e com 85% de humidade relativa, relativamente à massa no estado seco a 10 cm de profundidade apresentam-se na tabela 5.8. A tabela 5.9 apresenta os valores do teor de higroscopicidade a 20 cm de profundidade.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio do teor de higroscopicidade para as amostras a 10 cm de profundidade

Nº Amostra	Amostra seca + Caixa de Petri (g)	Amostra amb. cond.+ Caixa de Petri (g)	Teor de higroscopicidade (%)
A1	16,116	16,230	2,86
B1	34,195	34,432	4,57
C1	15,225	15,290	1,94
D1	14,680	14,710	1,28
E1	14,326	14,368	2,16
F1	26,663	26,710	1,54
G1	15,592	15,647	1,78
H1	16,014	16,132	3,15
I1	15,114	15,166	2,93

Tabela 5.9 – Resultados do ensaio do teor de higroscopicidade para as amostras a 20 cm de profundidade

Nº Amostra	Amostra seca + Caixa de Petri (g)	Amostra amb. cond.+ Caixa de Petri (g)	Teor de higroscopicidade (%)
A2	14,706	14,784	2,73
B2	17,186	17,396	5,83
C2	16,537	16,728	5,02
D2	34,954	35,100	2,69
E2	31,109	31,143	1,79
F2	34,403	34,478	1,44
G2	14,473	14,502	1,21
H2	18,087	18,183	2,19
I2	18,829	19,024	2,93

5.7 – ENSAIO DE ADERÊNCIA DO REVESTIMENTO AO SUPORTE

Os revestimentos de paredes dos edifícios antigos devem garantir uma adequada aderência ao suporte durante o seu tempo de vida útil. A ausência de aderência acarreta alguns problemas, nomeadamente, destacamentos (agravados pela acção dos agentes atmosféricos e/ou presença de sais) [23]. Este ensaio permite determinar a aderência da argamassa de reboco ao suporte.

As paredes onde foi efectuado o ensaio são a Pr2 – vistas v2 e v3 (fig. 5.8) a Pr4 – vista v1 (fig. 5.10) e a Pr5 – vista v1 (fig. 5.11). A fig. 5.23 apresenta a planta parcial com as paredes “ensaiadas”. Foram

realizadas 2 séries de ensaios, uma vez que na primeira série não foi efectuada a “lixagem” da superfície dos “provetes”, o que originou a rotura pelo plano de colagem de algumas peças metálicas.

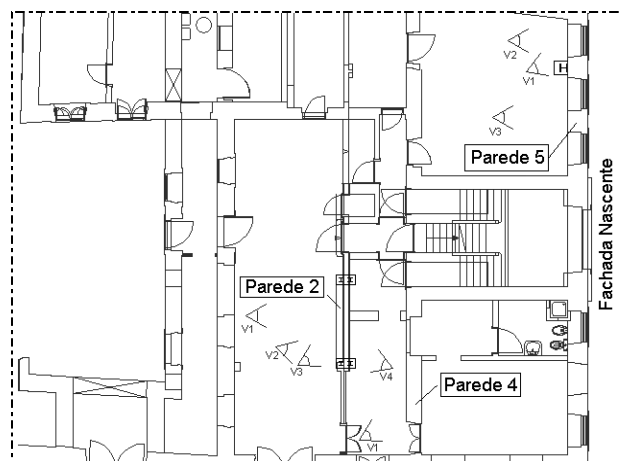


Fig. 5.23 – Planta parcial do piso -1 com indicação das paredes onde foi efectuado o ensaio de aderência

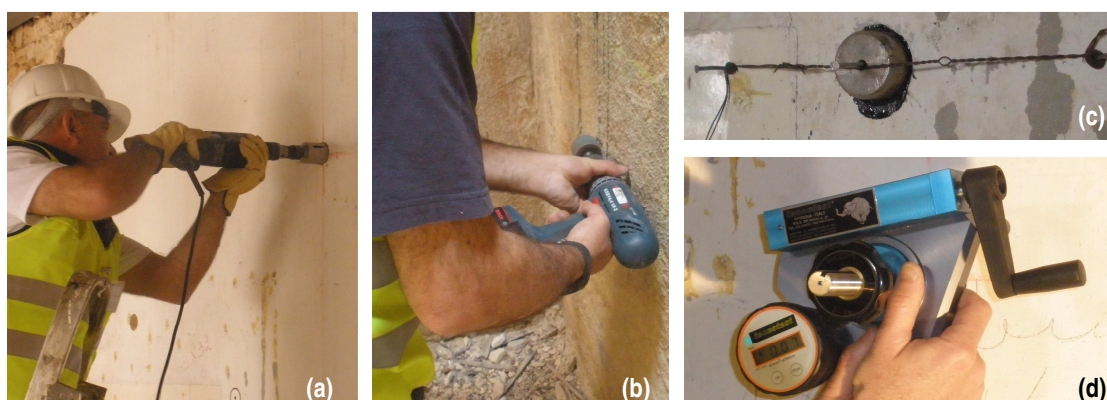
– *Material utilizado no ensaio:*

- dinamómetro;
- “pastilhas” cilíndricas de alumínio com 5,0 cm de diâmetro e 2,5 cm de altura;
- cola epoxídica;
- berbequim;
- acessórios para carotear e acessório para “lixar” a superfície da parede;
- giz, régua metálica de 1 m, fita métrica de 3 m, fio-de-prumo e escadote;
- “dispositivo” com pregos e arames para garantir a fixação das pastilhas na parede.

– *Procedimento de ensaio, fig. 5.24:*

- marcaram-se os pontos com giz, na parede onde iria ser realizado o ensaio, com o auxílio do fio-de-prumo, da fita métrica e da régua metálica;
- efectuou-se uma incisão com o berbequim e o acessório para carotear, com o diâmetro de 5,0 cm e com a profundidade do reboco, de forma a “isolar” a superfície onde a peça iria ser colada;
- fixou-se a “pastilha”, com a cola epoxídica;
- para garantir a fixação das “pastilhas” metálicas ao suporte, enquanto a cola não atingia a sua máxima resistência, foi criado um “dispositivo” com dois pregos e um arame;
- ao fim de alguns dias, depois de garantir que a cola já tinha atingido o tempo de secagem, iniciou-se o arrancamento das “pastilhas” com o dinamómetro.

Na segunda série de ensaios, para além da substituição da cola, procedeu-se à lixagem do “provete” onde iriam ser coladas as “pastilhas” metálicas, através de um acessório para este efeito. Assim, estas aderiram melhor ao reboco, não havendo erros na realização do ensaio.



(a) carotagem do “provete”; (b) lixagem do “provete”; (c) “dispositivo” de dois pregos e arame;
(d) arrancamento da “pastilha” com o dinamómetro

Fig. 5.24 – Procedimento utilizado no ensaio de aderência do revestimento ao suporte

5.7.1 – Primeira série do ensaio de aderência do revestimento ao suporte

Nesta primeira série colaram-se 9 “pastilhas” metálicas, das quais:

- 3 foram fixadas na Parede 2 – vista v2, fig. 5.25;
- 2 foram fixadas na Parede 4 – vista v1, fig. 5.27;
- 4 foram fixadas na Parede 5 – vista v1, fig. 5.29.

A cola utilizada para a sua fixação foi uma cola epoxídica com dois componentes da marca *Ceys Araldit*, com resistência à tracção até 35 MPa a temperaturas de -60°C até 65°C. O tempo de endurecimento é de 6 horas e atinge a máxima resistência ao fim de 3 dias (a temperatura de 20°C) [56].

– Resultados do ensaio de aderência na Parede 2 segundo a vista v2

As “pastilhas” metálicas na Parede 2 segundo a vista v2 deveriam ter sido coladas segundo uma linha vertical previamente definida, a três alturas diferentes, como apresentado na fig. 5.25. No entanto, apesar de terem sido fixadas a três alturas diferentes, não foi possível colá-las segundo essa direcção vertical, uma vez que em algumas zonas, a argamassa era tão fraca que o “provete” se desagregava quando se procedia à carotagem. Pode observar-se ainda na fig. 5.25 as quatro carotes efectuadas, em que apenas uma se apresentava em condições de ser ensaiada.

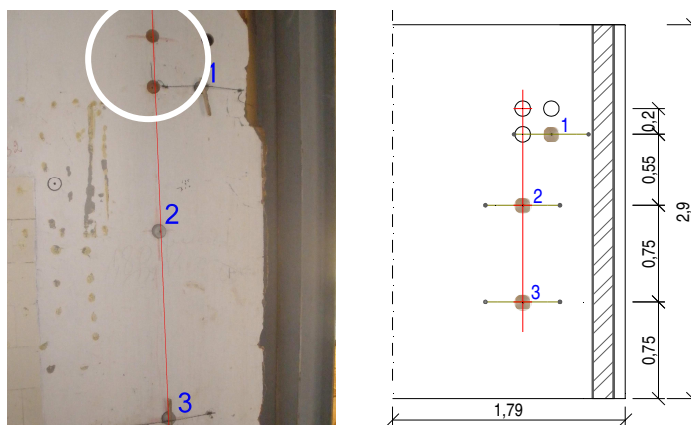


Fig. 5.25 – Marcação vertical e “pastilhas” coladas na Parede 2 – vista v2

Como já referido anteriormente, a Parede 2 é uma parede interior resistente de frontal em “Cruz de Santo André” com 0,25 m de espessura e reboco de argamassa de cal aérea e areia estucada, tendo sofrido posteriores alterações, provavelmente pelo preenchimento de uma porta com tijolo maciço e furado e argamassa de cimento. A fixação das 3 “pastilhas” metálicas efectuou-se apenas no reboco de argamassa de cimento, pois a argamassa de cal aérea e areia (da Parede 2) apresentava fraca resistência mecânica, não “resistindo” sequer às carotagens efectuadas.

Depois de se proceder à remoção das “pastilhas”, registaram-se os resultados. Na fig. 5.26 apresentam-se imagens dos “provetes” após o ensaio e na tabela 5.10 os resultados obtidos.

Tabela 5.10 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 2 – vista v2

Tipo de Argamassa	“Provete” Nº	Força (kN)	Tensão de aderência (Mpa)		Tipo de rotura ⁽³⁾
				Média	
Argamassa de cimento	1	0,16	0,08 ⁽¹⁾	0,38	Adesiva
	2	-	- ⁽²⁾		Plano de colagem
	3	1,34	0,68		Adesiva

⁽¹⁾ Possível erro de medição pois o valor é muito pequeno

⁽²⁾ Não foi possível registar nenhum valor pois a rotura ocorreu assim que o ensaio foi iniciado

⁽³⁾ O conceito teórico de cada tipo de rotura foi descrito no Capítulo 4, na pág. 50



Fig. 5.26 – “Provetes” extraídos da Parede 2 – vista v2

– Resultados do ensaio de aderência na Parede 4 segundo a vista v1

Na Parede 4 segundo a vista v1 tentou avaliar-se a aderência do estuque, pois através de anteriores carotagens nesta mesma parede concluiu-se que a sua argamassa (cal aérea e areia) tinha resistência mecânica praticamente nula (não “resistiu” à carotagem, desagregando o “provete”).

Para avaliar a aderência do estuque na Parede 4 segundo a vista v1 foram fixadas 2 “pastilhas”, segundo uma direcção vertical previamente definida. Quando se procedia à colagem da peça metálica nº5, a superfície previamente caroteada desagregou-se. Desta forma, fixou-se a “pastilha” ligeiramente ao lado da linha vertical apresentada na fig. 5.27.

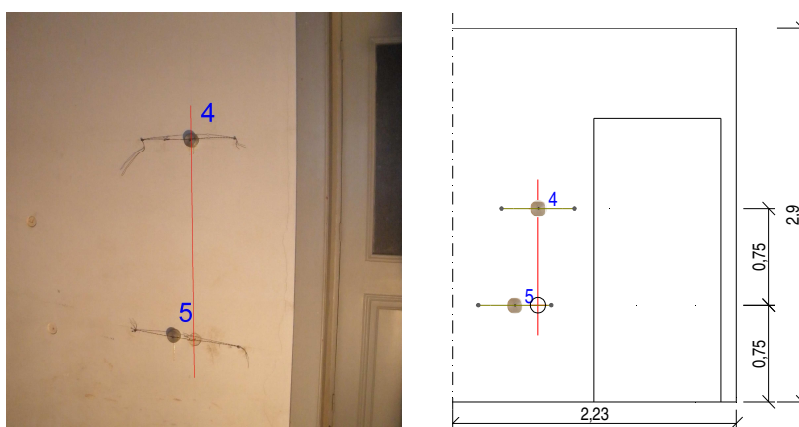


Fig. 5.27 – Marcação vertical e “pastilhas” coladas na Parede 4 – vista v1

Depois de se proceder à remoção das “pastilhas”, registaram-se os resultados. Na fig. 5.28 apresentam-se as imagens dos “provetes” após o ensaio e na tabela 5.11 os resultados obtidos.

Tabela 5.11 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 4 – vista v1

Tipo de Argamassa	“Provete” Nº	Força (kN)	Tensão de aderência (Mpa)		Tipo de rotura
				Média	
Estuque	4	0,63	0,32	0,28	Coesiva no suporte
	5	0,45	0,23		Coesiva no suporte

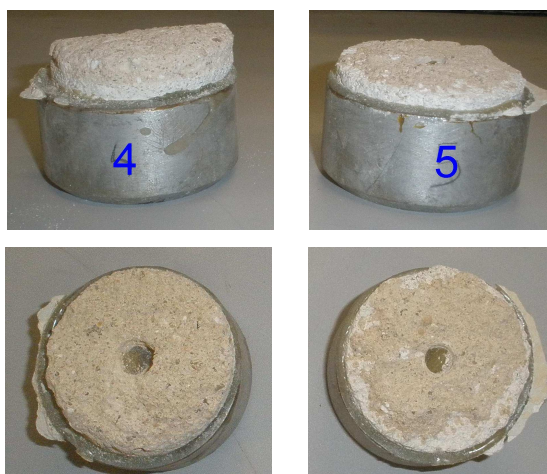


Fig. 5.28 – “Provetes” extraídos da Parede 4 – vista v1

– Resultados do ensaio de aderência na Parede 5 segundo a vista v1

Na Parede 5 segundo a vista v1 colaram-se 4 “pastilhas” segundo a disposição apresentada na fig. 5.29.

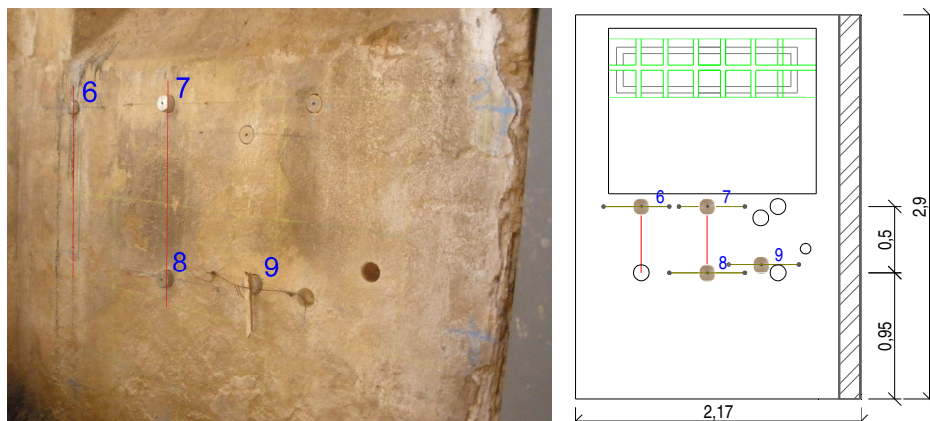


Fig. 5.29 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 5 – vista v1

Optou-se por esta parede, porque a constituição da argamassa era diferente das paredes já estudadas (antes do ensaio, não se sabia exactamente que tipo de reboco era, apenas que seria distinto das restantes paredes estudadas).

Depois de proceder à remoção das “pastilhas” metálicas, registaram-se os resultados. Na fig. 5.30 apresentam-se as imagens dos “provetes” após o ensaio e na tabela 5.12 os resultados obtidos.

Tabela 5.12 – Resultados da primeira série do ensaio de aderência na Parede 5 – vista v1

Tipo de Argamassa	“Provete” Nº	Força (kN)	Tensão de aderência (Mpa)		Tipo de rotura
				Média	
Argamassa com ligante cimentício	6	0,51	0,26 ⁽¹⁾	0,31	Plano de colagem
	7	-	- ⁽²⁾		Plano de colagem
	8	0,67	0,34 ⁽¹⁾		Plano de colagem
	9	0,67	0,34 ⁽¹⁾		Plano de colagem

(1) Rotura pelo plano de colagem devido ao facto da superfície não ter sido limpa

(2) Não foi possível registar nenhum valor pois a rotura deu-se assim que o ensaio foi iniciado

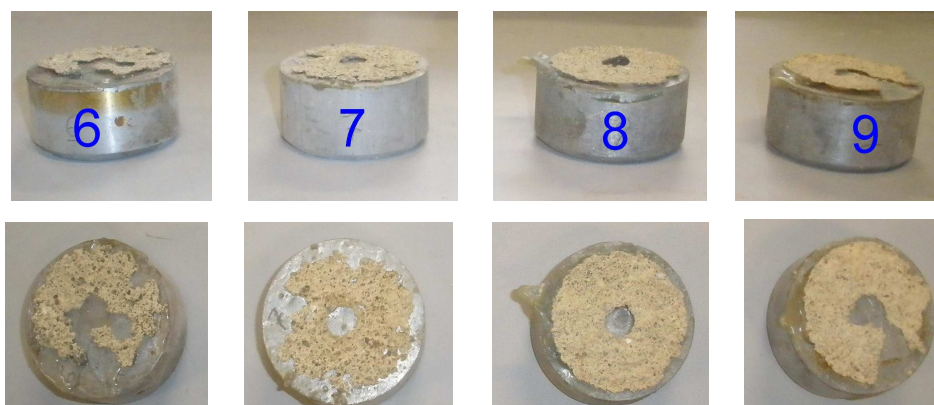


Fig. 5.30 – “Provetes” extraídos da Parede 5 – vista v1

Analisando os valores obtidos, constatou-se que os únicos resultados conclusivos foram os do “provete” nº3 da Parede 2 segundo a vista v2 (fig. 5.25) e os dois “provetes” da Parede 4 segundo a vista v1 (fig. 5.27). Deste modo, e como já referido anteriormente, procedeu-se a uma segunda série de ensaios.

5.7.2 – Segunda série do ensaio de aderência do revestimento ao suporte

Na segunda série colaram-se 8 “pastilhas” metálicas das quais:

- 4 foram fixadas na Parede 2 – vista v3, fig. 5.31;
- 4 foram fixadas na Parede 5 – vista v1, fig. 5.33.

Nesta segunda série utilizou-se uma pasta com dois componentes, uma resina e um endurecedor, da marca *Rea*, tendo uma densidade de $1,46 \text{ g/m}^3$ a 20°C , depois de misturados. O seu tempo de cura é de 2 horas, a 50°C [57]. Não sendo possível conhecer a resistência à tracção desta pasta, não se efectuou uma comparação entre as duas colas utilizadas nas duas séries.

– Resultados do ensaio de aderência na Parede 2 segundo a vista v3

Na Parede 2 segundo a vista v3 colaram-se 3 “pastilhas” ao lado das previamente removidas na primeira série, segundo uma linha vertical definida, fig. 5.31. Fixou-se a “pastilha” nº 2A na superfície onde se removeu o “provete” nº2 no ensaio da primeira série, em que a rotura ocorreu pelo plano de colagem (fig. 5.26). A designação das duas vistas nesta parede (vista v2 para a primeira série e vista v3 para a segunda série) é apenas devida ao local de observação da mesma.

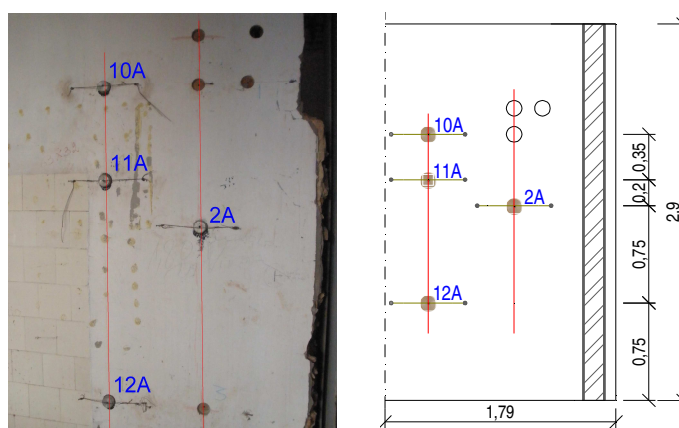


Fig. 5.31 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 2 – vista v3

Depois de proceder à remoção das “pastilhas” metálicas, registaram-se os resultados. Na fig. 5.32 apresentam-se as imagens dos “provetes” após o ensaio e na tabela 5.13 os resultados obtidos.

Tabela 5.13 – Resultados da segunda série do ensaio de aderência na Parede 2 – vista v3

Tipo de Argamassa	“Provete” Nº	Força (kN)	Tensão de aderência (Mpa)	Média	Tipo de rotura
Argamassa de cimento	2A	1,73	0,88	1,42	Adesiva
	10A	4,16	2,12		Coesiva na argamassa
	11A	2,73	1,39		Adesiva
	12A	2,51	1,28		Coesiva na argamassa

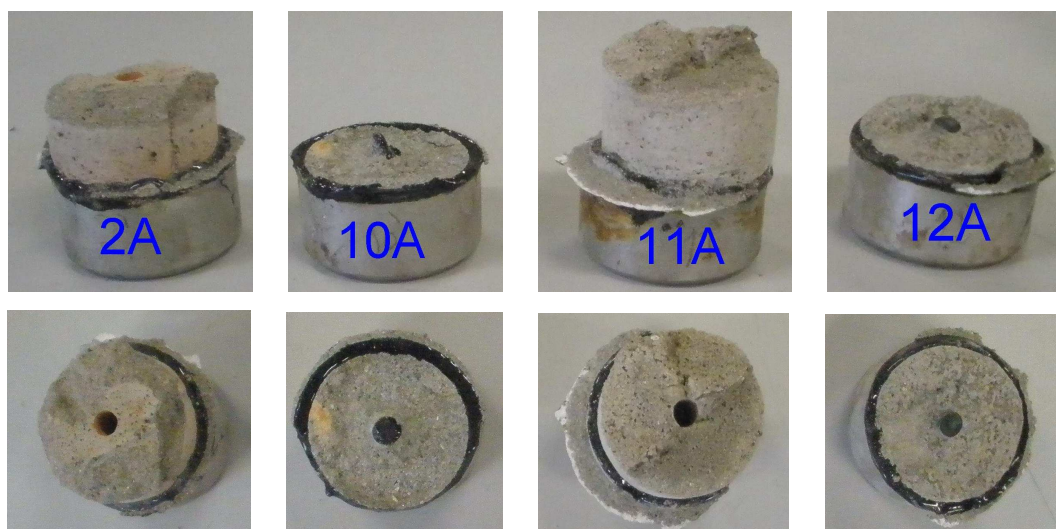


Fig. 5.32 – “Provetes” extraídos da Parede 2 – vista v3

– Resultados do ensaio de aderência na Parede 5 segundo a vista v1

As “pastilhas” nº 6A, 7A e 8A colaram-se nas superfícies onde se encontravam os “provetes” nº 6, 7 e 8, na primeira série do ensaio, em que a rotura ocorreu pelo plano de colagem (fig. 5.30). Fixou-se a “pastilha” nº 13A segundo a linha vertical da nº 6A, fig. 5.33.



Fig. 5.33 – Marcações verticais e “pastilhas” coladas na Parede 5 – vista v1

Depois de proceder à remoção das “pastilhas” metálicas registaram-se os resultados. Na fig. 5.34 apresentam-se as imagens dos “provetes” após o ensaio e na tabela 5.14 os resultados obtidos.

Tabela 5.14 – Resultados da segunda série do ensaio de aderência na Parede 5 segundo a vista v1

Tipo de Argamassa	“Provete” Nº	Força (kN)	Tensão de aderência (Mpa)		Tipo de rotura
				Média	
Argamassa com ligante cimentício	6A	1,49	0,76	0,85	Adesiva
	7A	2,73	1,39		Coesiva na argamassa
	8A	1,47	0,75		Adesiva
	13A	1,00	0,51		Coesiva na argamassa

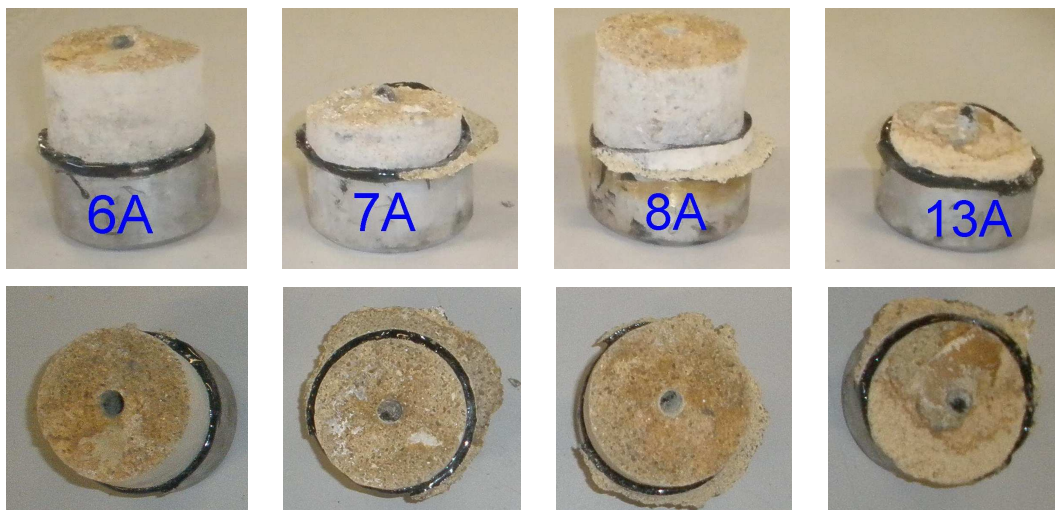


Fig. 5.34 – “Provete” extraídos da Parede 5 – vista v1

Nesta segunda série de ensaios, a “lixagem” da superfície dos “provete” e a utilização de uma resina que originou uma melhor colagem, permitiu obter resultados mais fiáveis para a tensão de aderência das diversas argamassas constituintes das paredes em estudo.

5.8 – SÍNTESE DE RESULTADOS

Seguidamente apresenta-se uma síntese de todos os resultados obtidos nos ensaios efectuados.

– Ensaio de termografia

Os resultados obtidos no ensaio de termografia (termogramas) apresentaram-se na fig. 5.15 (relativamente à Parede 1 – vista v1) e na fig. 5.16 (relativamente à Parede 6 – vista v1).

– Ensaio de ultra-sons

Pelo método directo e semi-directo não se obteram resultados na Parede 3 – vistas v1, v2 e v3 (fig. 5.18).

Na fig. 5.35 apresentam-se os resultados pelo método directo na Parede 2 – vista v4 (fig. 5.19) na direcção horizontal, para as malhas de 0,50 m e 0,25 m, respectivamente. Na fig. 5.36 apresentam-se os resultados na Parede 2 – vista v4 na direcção vertical, para as malhas de 0,50 m e 0,25 m, respectivamente.

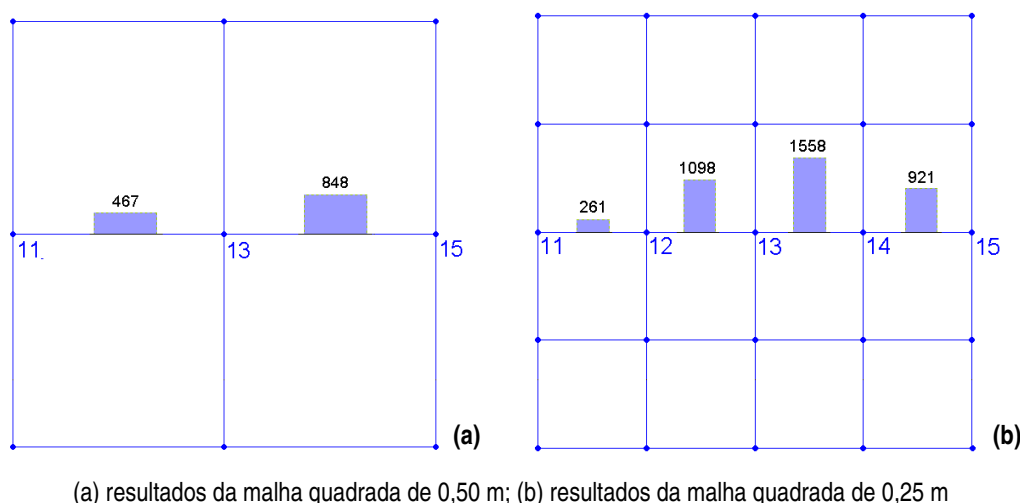


Fig. 5.35 – Velocidade de ultra-sons (m/s) pelo método indirecto na direcção horizontal na Pr. 2 – vista v4

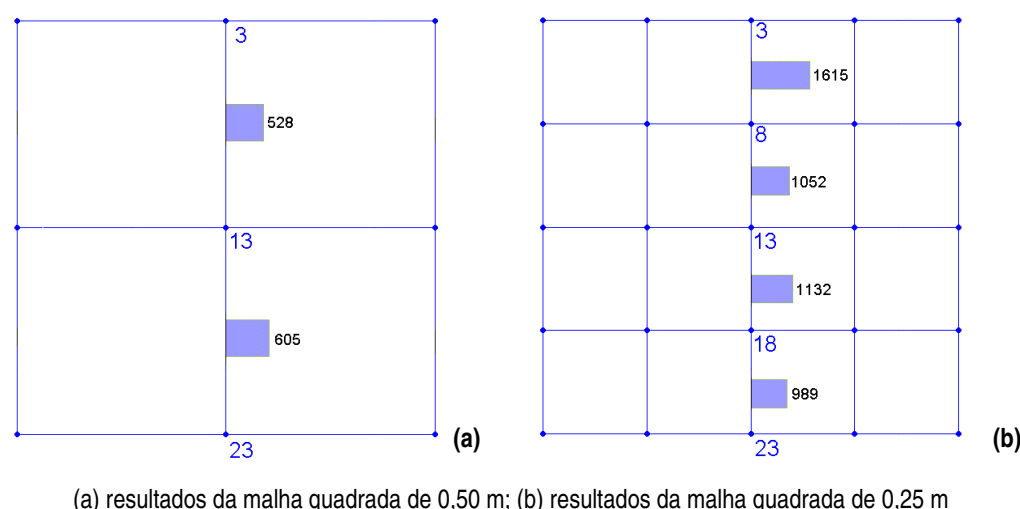


Fig. 5.36 – Velocidade de ultra-sons (m/s) pelo método indirecto na direcção vertical na Pr. 2 – vista v4

– Ensaio de determinação do teor de humidade e de higroscopicidade

Nas figs. 5.37 e 5.38 apresentam-se os resultados obtidos na Parede 5 segundo a vista v3, nos ensaios de determinação do teor de humidade e higroscopicidade, respectivamente.

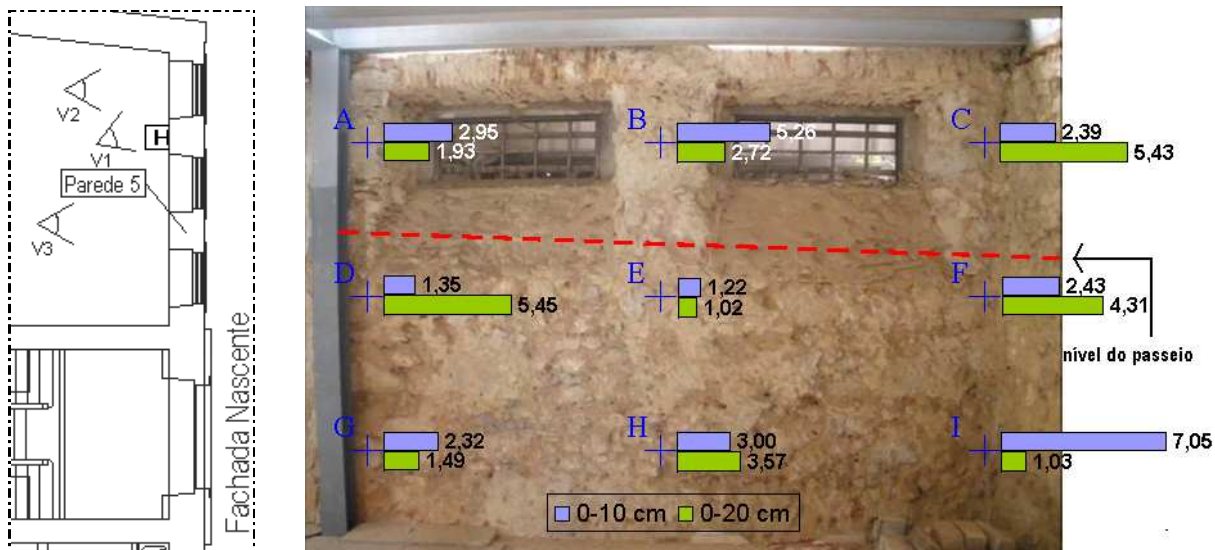


Fig. 5.37 – Teores de humidade (%) ao longo da Pr 5 – vista v3

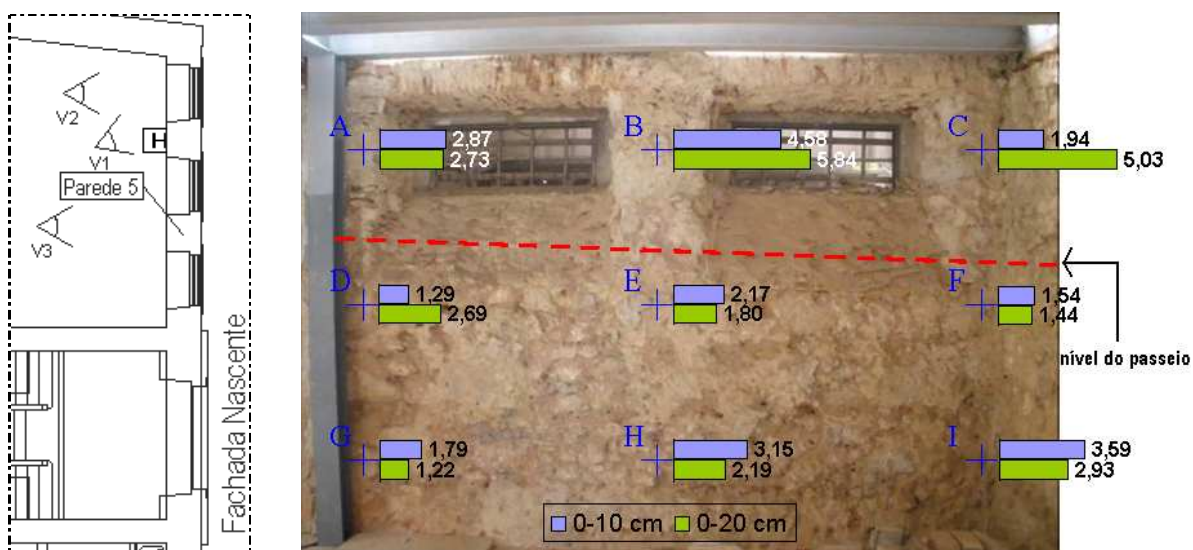
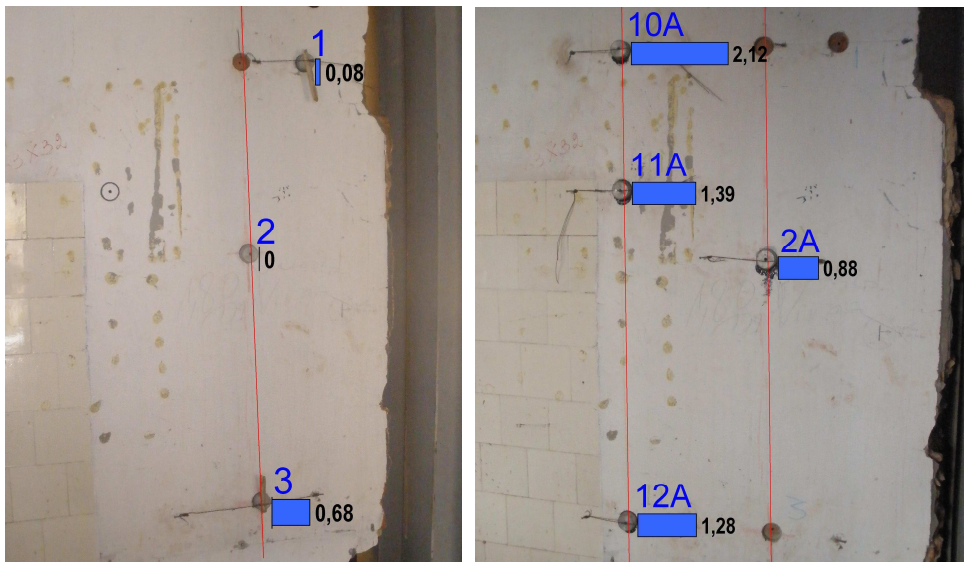


Fig. 5.38 – Teores de higroscopicidade (%) ao longo da Pr 5 – vista v3

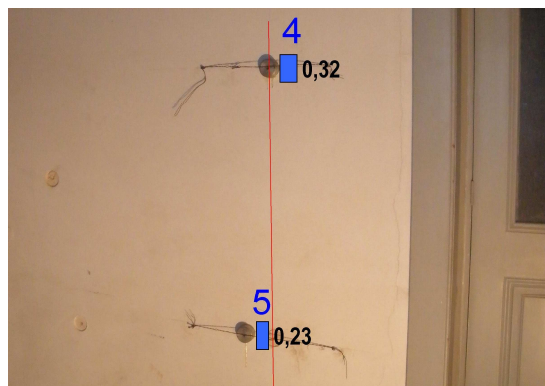
– Ensaio de aderência do revestimento ao suporte

Nas figs. 5.39, 5.40 e 5.41 apresentam-se os resultados obtidos nas duas séries do ensaio de aderência do revestimento ao suporte na Parede 2 segundo as vistas v2/v3, na Parede 4 segundo a vista v1 e na Parede 5 segundo a vista v1.



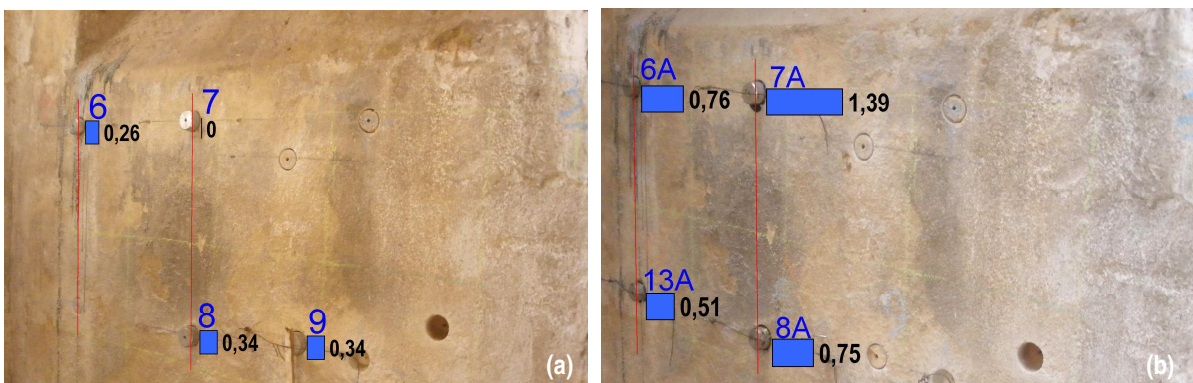
1, 3, 2A e 11A – rotura adesiva; 2 – rotura pelo plano de colagem; 10A e 12A – rotura coesiva na argamassa
(a) tensões de aderência na Pr. 2 – vista v2 para a 1ª série; (b) tensões de aderência na Pr. 2 – vista v3 para a 2ª série

Fig. 5.39 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 2 – vistas v2 e v3



4 e 5 – rotura coesiva no suporte

Fig. 5.40 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 4 – vista v1



6, 7, 8 e 9 – rotura pelo plano de colagem; 6A e 8A – rotura adesiva; 7A e 13A – rotura coesiva na argamassa
(a) tensões de aderência na Pr. 5 – vista v1 para a 1ª série; (b) tensões de aderência na Pr. 5 – vista v1 para a 2ª série

Fig. 5.41 – Tensões de aderência (MPa) na Parede 5 – vista v1

5.9 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Seguidamente procede-se à análise e discussão dos resultados obtidos com os ensaios efectuados.

– Ensaio de termografia

Os termogramas recolhidos no ensaio de termografia permitem comprovar que este é um método útil para a detecção qualitativa da humidade superficial em paredes, neste caso na Parede 1, fig. 5.15 (pág. 68).

Na fig. 5.15 (b), previamente ao humedecimento da parede, observa-se que esta se encontra a uma temperatura de cerca de 22°C. No termograma (d) da mesma figura, imediatamente após o humedecimento, constata-se o decréscimo de temperatura apenas no contorno da “mancha” de humidade, uma vez que a água ainda não “penetrou” totalmente na Parede 1, pelo que esta ainda não se encontra totalmente humedecida. Finalmente, no termograma (f) da mesma figura, 10 minutos após o humedecimento, já é visível a “mancha” uniforme de humidade de cerca de 17°C de temperatura, devido ao facto da água já se ter introduzido na parede (o que provocou a sua redução de temperatura).

Relativamente à observação de elementos de madeira no interior da Parede 6, estes são visíveis no termograma da fig. 5.16 (pág. 69), pois esta parede não apresenta reboco (são visíveis “a olho nu” os elementos de madeira da Parede 6, na mesma figura), facilitando a sua observação com a câmara termográfica. É de notar ainda a temperatura mais elevada destes elementos de madeira face ao resto da parede.

Caso a Parede 6 tivesse reboco, tornava-se mais difícil observar o seu interior com recurso à termografia passiva, pois deixava de haver uma diferença significativa de temperatura entre os diversos materiais da parede, como se constatou noutras observações efectuadas em paredes rebocadas. Apenas com um sistema gerador de calor (termografia activa), seria possível observar tanto os diferentes materiais presentes na parede, como outras heterogeneidades e defeitos.

– Ensaio de ultra-sons

Este ensaio efectuou-se pelos métodos referidos no Capítulo 4: directo, semi-directo e indirecto. Nos dois primeiros não se obtiveram resultados. Este facto pode ficar a dever-se à elevada heterogeneidade dos materiais constituintes da Parede 3 (fig. 5.9), que impedem a “passagem” das ondas ultra-sónicas. Esta é uma das razões pela qual o ensaio de ultra-sons é mais utilizado em elementos de betão (maior homogeneidade do que as paredes antigas de alvenaria). Para elementos com elevada heterogeneidade utilizam-se normalmente ensaios sónicos, com um martelo instrumentado, referidos no Capítulo 4.

Relativamente aos resultados da velocidade dos ultra-sons pelo método indirecto (figs. 5.35 e 5.36), compararam-se com o trabalho realizado por Magalhães *et al* [31], que efectuaram uma caracterização

de revestimentos em paredes antigas, através de vários ensaios *in situ*, entre os quais o ensaio de ultra-sons pelo método indirecto. Os resultados são apresentados na tabela 5.15.

Tabela 5.15 – Ensaio de ultra-sons realizado por Magalhães *et al* [31]

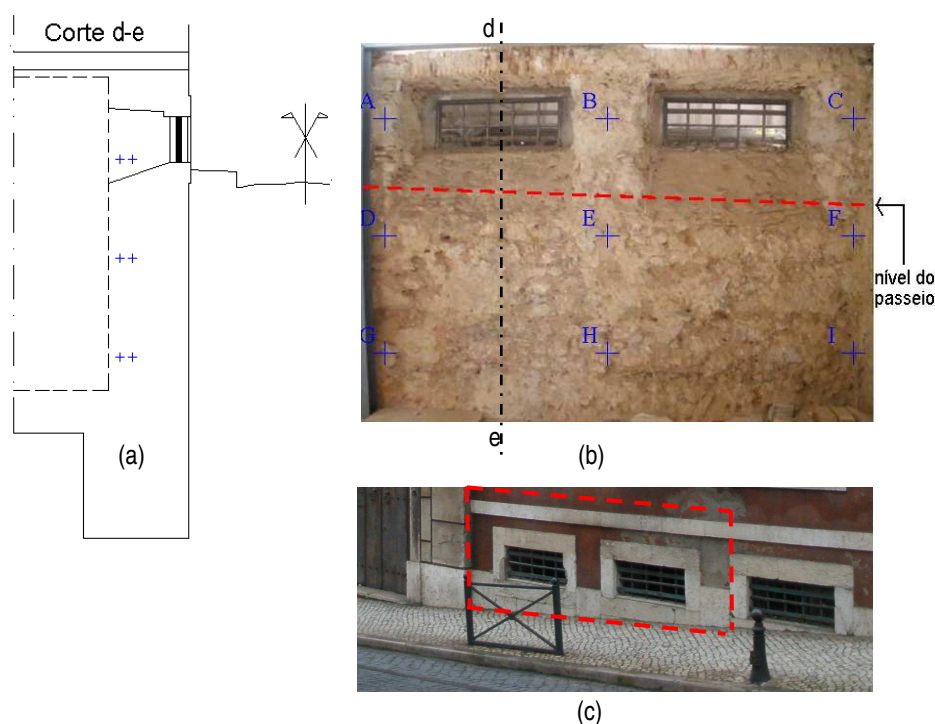
Edifício	Nível de degradação	Tipo de argamassa	Velocidade (m/s)
Forte 1	Reduzido	Nova (argamassa com base em cal aérea de carácter hidrófugo)	1100
	Médio		1053
	Elevado		898
Forte 2	Elevado	Antiga (argamassa com base em cal aérea)	1467
	Reduzido		1350
	Reduzido	Nova (argamassa com base em cimento)	1647

Os valores obtidos neste trabalho (figs. 5.35 e 5.36) apresentam a mesma ordem de grandeza comparando com as velocidades de ultra-sons apresentadas por Magalhães *et al* [31]. No entanto dada a composição do material, os valores são meramente indicativos, não sendo possível, desta forma, obter qualquer conclusão.

.– Ensaio de determinação do teor de humidade

Antes do início do ensaio observou-se, por inspecção visual e pelo tacto, que a Parede 5 – vista v3 (fig. 5.37) se encontrava húmida. Uma das possíveis causas desta humidade, será através da absorção, pelo solo, da água de precipitação (que por sua vez penetra na parede por acção da gravidade), proveniente da Rua de S. Domingos à Lapa, pois a Parede 5 encontra-se parcialmente enterrada e a rua em questão apresenta uma inclinação acentuada, como se pode observar na fig. 5.42. Deste modo, o local com teor de humidade mais elevado poderá ser ao nível do passeio da rua (pontos D-E-F), na espessura de 20 cm, pois as amostras recolhidas segundo esta profundidade encontram-se mais próximas do exterior do edifício (e por sua vez do terreno), fig. 5.42. Na direcção horizontal D-E-F, os teores de humidade dos pontos D e F da fig. 5.37 validam esta hipótese pois apresentam teores de humidade mais elevados para a profundidade de 20 cm. Já o ponto E apresenta um teor de água, a 20 cm, muito inferior aos dois já referidos. Este facto pode ficar a dever-se à elevada heterogeneidade da parede, uma vez que foram efectuados dois furos, lado a lado, para as duas profundidades, podendo um desses furos ter sido efectuado na argamassa de ligação das pedras e outro na própria pedra, apresentando desta forma, teores de humidade substancialmente diferentes, devido à sua distinta capacidade de absorção de água.

Observando globalmente os resultados obtidos, constata-se que o ponto I apresenta um teor de humidade à profundidade de 10 cm bastante mais elevado relativamente à de 20 cm e aos restantes pontos. Também neste ponto os resultados podem dever-se à elevada heterogeneidade da parede.



(a) Parede 5 – vista v3 com marcação do nível do passeio; (b) corte d-e da Parede 5 – vista v3;

(c) fachada nascente parcial do Palacete Lusitânia com indicação onde se encontra a Parede 5 – vista v3

Fig. 5.42– Parede 5 – vista v3 com o nível do passeio, corte d-e e a indicação do local onde se encontra a parede na fachada nascente

Os teores de água na direcção vertical C-F-I são também superiores, para a profundidade de 20 cm, (exceptuando-se o ponto I) relativamente às outras direcções verticais. Este aspecto pode ser devido à execução de uma parede de betão sobre a parede perpendicular à Parede 5 – vista v3, o que pode ter afectado os resultados obtidos (devido à água utilizada para a confecção do betão, por exemplo).

Os teores de água na direcção horizontal A-B-C, parecem indicar que pode existir uma eventual ascensão (por capilaridade) da água infiltrada na Parede 5 segundo a vista v3.

A distribuição global dos teores de água não permitem chegar a uma conclusão definitiva sobre a possível causa da humidade. Já foi referida a elevada heterogeneidade da Parede 5 – vista v3 e a parede de betão que se encontra sobre a parede perpendicular à Parede 5 como factores que podem ter afectado os resultados. Também o facto de o edifício se encontrar em fase de reabilitação com vários trabalhos nas proximidades e mesmo na parede em questão pode ter eventualmente afectado os resultados obtidos neste ensaio.

– Ensaio de determinação do teor de higroscopicidade

Para verificar que o humedecimento da Parede 5 – vista v3 (fig. 5.38) resulta da higroscopicidade dos materiais (e não de qualquer outra causa de humidade), o teor de higroscopicidade da parede,

determinado num ambiente de 20°C e humidade relativa superior a 75%, deve ser superior ao seu teor de água [27, 60].

Como referido anteriormente, na altura da recolha das amostras na Parede 5 – vista v3, o compartimento onde esta estava inserida apresentava uma humidade relativa de 78% e uma temperatura de 20,5 °C. Esta elevada humidade relativa pode ter eventualmente provocado a dissolução dos sais existentes, originando manchas de humidade. Como a parede não apresentava revestimento, não foi possível detectar essas manchas (embora se tenha verificado visualmente e pelo tacto que esta se encontrava húmida).

Para determinar se a manifestação de humidade da parede seria por higroscopicidade, efectuou-se uma comparação dos teores de água (fig. 5.37) e de higroscopicidade (fig. 5.38) nos diversos pontos da parede. Esta comparação de resultados não permite confirmar que a única causa da humidade na Parede 5 – vista v3 é devido à higroscopicidade dos seus materiais.

Concluída a análise dos resultados dos ensaios de humidade e higroscopicidade, não é possível confirmar que a origem da humidade seja apenas devida a uma única causa. O mais provável será uma junção de várias causas, isto é, os efeitos da penetração da água de precipitação no terreno e por sua vez na parede (humidade do terreno proveniente de águas superficiais), aliada à existência de sais solúveis higroscópicos e à elevada humidade relativa do compartimento (humedecimento da parede pela dissolução dos sais).

– Ensaio de aderência do revestimento ao suporte

O ensaio de aderência do revestimento ao suporte foi realizado em três paredes com argamassas de reboco distintas. A Parede 2 segundo as vista v2/v3 (fig. 5.39) é constituída por um reboco de argamassa de cimento. A Parede 4 segundo a vista v1 (fig. 5.40) apresenta um reboco de argamassa de cal aérea e areia, mas tentou avaliar-se apenas a aderência do estuque, pois a argamassa de cal aérea desagregou-se facilmente ao efectuar as carotagens. Relativamente ao reboco da Parede 5 segundo a vista v1 (fig. 5.41), assumiu-se como sendo constituído por uma argamassa com algum teor de ligante cimentício (pelas razões referidas no ponto 5.2). Efectuaram-se duas séries de ensaios, pois na primeira série alguns tipos de rotura e tensões obtidas nos “provetes” não foram conclusivos, devido à má distribuição da cola e à ausência de “lixagem” na sua superfície. Na segunda série, obtiveram-se tensões de aderência e tipos de rotura aceitáveis. No entanto, após a sua realização, concluiu-se que era preferível efectuar a “lixagem” da superfície antes da carotagem, pois a primeira introduziu vibrações nos “provetes” (o que pode ter afectado as tensões de aderência ao suporte).

Relativamente à 1ª série de ensaios:

- na Parede 2 – vista v2 obtiveram-se os resultados apresentados na fig. 5.39 a. No entanto, considerou-se que apenas a tensão de 0,68 MPa no “provete” nº3 apresentava um resultado válido, pelo que houve a necessidade de ser realizada uma 2ª série de ensaios nesta parede;
- na Parede 4 – vista v1 obtiveram-se os resultados apresentados na fig. 5.40, com uma tensão média de 0,28 MPa (rotura coesiva no suporte). Tanto o tipo de rotura dos “provetes” como os resultados da tensão de aderência foram aceitáveis, pelo que não se procedeu a uma 2ª série de ensaios nesta parede;
- na Parede 5 – vista v1, obtiveram-se os resultados apresentados na fig. 5.41 a. Pelo tipo de rotura dos “provetes”, concluiu-se que seria necessário proceder a uma 2ª série de ensaios (ocorreram erros na sua execução, já referidos anteriormente), não considerando os resultados obtidos.

Relativamente à 2ª série de ensaios:

- na Parede 2 – vista v3 obtiveram-se os resultados apresentados na fig. 5.39 b. Tanto o tipo de rotura como os resultados da tensão de aderência foram aceitáveis. Como já referido anteriormente, a designação das duas vistas nesta parede (vista v2 para a 1ª série e vista v3 para a 2ª série) é apenas devida ao local de observação da mesma;
- na Parede 5 – vista v1, obtiveram-se os resultados apresentados na fig. 5.4 b. Tanto o tipo de rotura como os resultados da tensão de aderência foram aceitáveis.

Na tabela 5.16 apresenta-se o resumo das tensões de aderência consideradas “válidas” para as paredes estudadas.

Tabela 5.16 – Resumo das tensões de aderência consideradas “válidas” nas paredes em estudo

Paredes	Tipo de argamassa	Série	Nº “provete”	Tipo de rotura	Tensão de aderência (MPa)	
						Média
Parede 2 Vista v2/v3	Argamassa de cimento	1ª	3	Adesiva	0,68	0,68
		2ª	2A	Adesiva	0,88	1,14
			11A		1,39	
			10A	Coesiva na argamassa	2,12	1,7
			12A		1,28	
Parede 4 Vista v1	Estuque	1ª	4	Adesiva	0,32	0,28
			5		0,23	
Parede 5 Vista v1	Argamassa com ligante cimentício	2ª	6A	Adesiva	0,76	0,76
			8A		0,75	
			7A	Coesiva na argamassa	1,39	0,95
			13A		0,51	

Os resultados foram comparados com os trabalhos realizados por Veiga [55] e por Flores-Colen *et al* [23]. Veiga [55] efectuou uma análise de algumas formulações de argamassas para revestimentos de

paredes de edifícios antigos através de diversos ensaios, entre os quais o de aderência do revestimento ao suporte. Os resultados apresentam-se na tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Resultados do ensaio de aderência obtidos por Veiga [55]

Tipo de Argamassa	Dosagem Volumétrica	Composição	Tensão de Aderência (MPa)
Cimento	1:4	Cimento: areia do rio	0,07 ⁽¹⁾
Bastarda de Cal aérea e Cimento	1:3:12	Cimento branco: cal aérea: areia predominante em sílica	0,12
	1:1:6	Cimento: cal aérea: areia do rio	0,1 ⁽²⁾
Cal aérea	1:3	Cal aérea em pó: areia predominante em sílica	0
	1: 0,5: 2,5	Cal aérea em pó: pozolona: areia predominante em sílica	0,14
	1: 1,5+1,5	Cal aérea carácter hidrófugo: areia rio + areia Corroios	0

(1) rotura adesiva

(2) rotura adesiva+ rotura coesiva

Comparando os resultados obtidos, verifica-se que as tensões de aderência das paredes estudadas no Palacete Lusitânia são bastante superiores. No entanto, os resultados não são directamente comparáveis. Como referido no Capítulo 4, os factores que influenciam a aderência da argamassa de reboco ao suporte são o tipo de ligante, o seu teor e o tipo de suporte. Os ensaios de Veiga [55] foram efectuados em suportes de tijolo furado, menos absorventes e menos rugosos, diminuindo a aderência do revestimento. No caso do Palacete Lusitânia, a única parede que apresenta um suporte idêntico é a Parede 2 – vista v2/v3 (fig. 5.41) que, como já referido anteriormente, sofreu uma alteração com o preenchimento de um vão com tijolo furado. Dos “provetes” extraídos nesta parede, apenas o nº2A e o nº3 se encontravam no suporte de tijolo furado. Efectivamente, estes apresentam uma tensão de aderência inferior aos restantes (nº10A, nº11A e nº12A), mas ainda assim, bastante superior relativamente ao trabalho de Veiga [55]. Este facto permite concluir que a argamassa de cimento da Parede 2 – vista v2/v3 pode conter um teor de ligante mais elevado do que a do trabalho de Veiga [55].

Como já referido anteriormente, algumas das carotagens efectuadas na Parede 4 (fig. 5.40) permitiram comprovar que a resistência mecânica das argamassas de cal aérea é praticamente nula, pois a carotagem originou a desagregação dos “provetes”. Duas das formulações do trabalho de Veiga [55], constituídas por cal aérea, apresentam tensões de aderência nulas, evidenciando desta forma a fraca resistência mecânica destas argamassas.

Flores-Colen *et al* [23] avaliaram a tensão de aderência para diversos revestimentos, entre os quais os que se referem na tabela 5.18. Segundo estes autores, os valores mínimos (de referência) da aderência, definidos nas normas são 0,3 MPa ou rotura coesiva na argamassa, para rebocos e 0,5 MPa, para estuques.

Tabela 5.18 – Resultados do ensaio de aderência obtidos por Flores-Colen *et al* [23]

Tipo de Revestimento	Suporte	Tensão de Aderência (MPa)		
		Valor mínimo	Valor máximo	Média
Reboco cimentício tradicional	Betão	0,11	1,25	0,79
Estuque projectado		0,32	0,91	0,67

Comparando os resultados, verifica-se que as tensões de aderência de 0,68 e 0,88 MPa (“provetes” nº2A e nº3, respectivamente) da argamassa de cimento da Parede 2 – vista v2/v3 (fig. 5.39) são semelhantes à média das tensões do reboco cimentício tradicional obtidas por Flores-Colen *et al* [23]. No entanto, os suportes de ambos os ensaios eram distintos (os “provetes” nº2A e nº3 encontravam-se num suporte de tijolo furado e os “provetes” de Flores-Colen *et al* [41] estavam num suporte de betão). Os restantes “provetes” desta parede, nº10A, nº11A e nº12A apresentam uma tensão de aderência superior, devido provavelmente ao suporte mais rugoso em que se encontravam (parede de frontal em “Cruz de Santo André” preenchida com alvenaria ordinária e outros detritos).

Relativamente aos resultados das tensões de aderência do estuque na Parede 4 – vista v1 (fig. 5.40) e do estuque projectado obtidas por Flores-Colen *et al* [23], verifica-se que a aderência do primeiro é bastante inferior. Neste caso, o reduzido valor de aderência do estuque na Parede 4 – vista v1 será provavelmente devido ao suporte de argamassa de cal aérea (fraca resistência mecânica).

As tensões de aderência consideradas na Parede 5 – vista v1 (fig. 5.41 b), na qual se assumiu uma argamassa com algum teor de ligante cimentício, são semelhantes à média das tensões do reboco cimentício tradicional obtidas por Flores-Colen *et al* [23]. Mas também neste caso o suporte em ambos os ensaios era diferente (a argamassa da Parede 5 segundo a vista v1 apresenta um suporte de alvenaria ordinária, mais rugoso). Os teores de ligantes das duas argamassas provavelmente também são distintos.

Depois de analisar os resultados das paredes estudadas no Palacete Lusitânia, verifica-se que a tensão de aderência da argamassa de cimento da Parede 2 – vista v2/v3 é a mais elevada, seguida da argamassa com algum teor cimentício da Parede 5 – vista v1 e do estuque da Parede 4 – vista v1. Este último apresenta uma aderência inferior, pois é essencialmente constituído por cal, gesso e areia fina, materiais com menor resistência mecânica que os cimentos.

Relativamente às duas argamassas de cimento, conclui-se que a da Parede 2 – vista v2/v3 poderá conter um teor de ligante mais elevado, pois, para o mesmo tipo de suporte, apresenta tensões de aderência superiores.

Relativamente aos valores mínimos de referência para a aderência referidos em [23] (0,3 MPa ou rotura coesiva na argamassa para rebocos e 0,5 MPa para estuques), todas as argamassas apresentam resultados bastante superiores, exceptuando-se o estuque, com tensões de aderência ligeiramente inferiores, provavelmente devido à fraca resistência mecânica do suporte (argamassa de cal aérea).

O facto de se terem utilizado “pastilhas” metálicas de secção circular na realização do ensaio pode ter eventualmente afectado os resultados da tensão de aderência obtidos, pelas razões já referidas no Capítulo 4 (pág. 49).

Capítulo 6

Comentários Finais e Conclusões. Desenvolvimentos Futuros

6.1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente trabalho efectuou-se uma descrição de soluções construtivas de edifícios antigos em Portugal e das suas anomalias, bem como os métodos mais correntes de diagnóstico de anomalias em paredes de edifícios antigos. Finalmente, estudou-se um edifício antigo em Lisboa, através de uma descrição das soluções construtivas dos seus elementos, das suas principais anomalias e da aplicação de alguns métodos de diagnóstico em diferentes paredes. A campanha experimental decorreu em condições de segurança.

Neste capítulo apresentam-se os principais comentários e conclusões obtidas com este trabalho, bem como os desenvolvimentos futuros.

6.2 – COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Relativamente ao ensaio de termografia, as observações efectuadas com a câmara termográfica evidenciaram a utilidade deste método na detecção qualitativa da humidade superficial na Parede 1, apesar do ensaio ter sido efectuado por termografia passiva, sem recurso a iluminação artificial. Observaram-se também os elementos de madeira no interior da Parede 6 (por termografia passiva), no entanto, a sua diferenciação na parede só foi possível porque esta não apresentava revestimento. Numa parede revestida, será mais proveitoso utilizar iluminação artificial, como projectores de luz ou outros sistemas geradores de calor, de modo a criar uma “estimulação” térmica dos materiais constituintes da parede, permitindo a sua diferenciação e visualização com o equipamento de termografia.

O ensaio de ultra-sons efectuou-se pelos métodos directo, semi-directo e indirecto. A ausência de resultados nos dois primeiros métodos pode ficar a dever-se à constituição interior da Parede 3 (elevada heterogeneidade), que impedem ou dificultam a propagação das ondas ultra-sónicas.

Pelo método indirecto, e comparando os resultados obtidos com os de Magalhães *et al* [31], estes apresentam a mesma ordem de grandeza, não sendo possível, no entanto, obter conclusões, pois os valores são meramente indicativos, dada a composição do material.

Relativamente ao equipamento de ultra-sons que se utilizou, não se revelou totalmente eficaz em alvenarias muito heterogéneas (como as dos edifícios antigos), facto evidenciado pela ausência de resultados através dos métodos directo e semi-directo. Nestes casos, será preferível utilizar ensaios sónicos com transmissores mecânicos geradores de sinais de baixa frequência (martelos instrumentados), que operam com uma frequência de onda inferior aos ultra-sónicos, sendo por isso mais eficazes na propagação das ondas sónicas.

Relativamente ao ensaio de determinação do teor de humidade que se efectuou na Parede 5 (vista v3), verifica-se que a principal causa do humedecimento da parede em questão pode ser a infiltração da água de precipitação no terreno e por sua vez na parede, por acção da gravidade, mas os valores obtidos não permitem chegar a uma conclusão definitiva. A elevada heterogeneidade desta parede e o facto de o edifício se encontrar em fase de reabilitação pode ter afectado os valores dos teores de água obtidos.

Também com o ensaio de determinação do teor de higroscopicidade não foi possível averiguar com certeza a causa da humidade na Parede 5 (vista v3).

A situação mais provável é uma junção de várias causas, ou seja, a humidade de precipitação que se infiltra no terreno e na parede, com a existência de sais solúveis higroscópicos e a elevada humidade relativa do compartimento (humedecimento da superfície pela dissolução dos sais).

O método que se utilizou para a recolha das amostras pode também levar a resultados grosseiros se não for correctamente executado, isto porque o berbequim tem de ser utilizado com algum cuidado, em baixa rotação e preferencialmente por um técnico experiente, de forma a diminuir o atrito entre a broca e a alvenaria e evitar a secagem acelerada das amostras. Após a recolha das amostras para os frascos estanques, estas devem ser encaminhadas o mais rapidamente possível para o laboratório, de modo a que não haja uma grande perda de humidade por parte das mesmas. Pela mesma razão, os frascos utilizados devem também ter o menor volume possível.

Relativamente ao ensaio de aderência do revestimento ao suporte, verifica-se que as tensões de aderência da argamassa de cimento da Parede 2 (vista v2/v3) são as mais elevadas, seguidas da argamassa com algum teor de ligante cimentício da Parede 5 (vista v1) e do estuque da Parede 4 (vista v1).

Relativamente às duas primeiras argamassas (de cimento), conclui-se que a da Parede 2 (vistas v2/v3) tem provavelmente um teor de ligante cimentício mais elevado, pois, para o mesmo tipo de suporte, apresenta tensões de aderência superiores.

Algumas das carotagens efectuadas na Parede 4 permitiram verificar que a resistência mecânica das argamassas de cal aérea é praticamente nula, pois os “provetes” desagregaram-se. Duas das

formulações do trabalho de Veiga [55], constituídas por cal aérea, apresentam tensões de aderência nulas, evidenciando assim a sua fraca resistência mecânica.

Verifica-se ainda, pela comparação com o trabalho de Flores-Colen *et al* [23], que a aderência do estuque na Parede 4 (vista v1) é fraca.

Relativamente aos valores mínimos de referência referidos por estes autores (0,3 MPa ou rotura coesiva na argamassa, para rebocos, e 0,5 MPa, para estuques), todas as argamassas apresentam tensões de aderência superiores, com excepção do estuque, que apresenta tensões ligeiramente inferiores. Assim, conclui-se que, em termos de aderência, as argamassas de cimento da Parede 2 (vista v2/v3) e da Parede 5 (vista v1) estão em bom estado. O estuque da Parede 4 (vista v1) apresenta uma fraca aderência (inferior aos valores mínimos), provavelmente devido à fraca resistência mecânica do suporte (argamassa de cal aérea).

A utilização nos ensaios de arrancamento de “pastilhas” metálicas de secção circular relativamente às “pastilhas” de secção quadrada pode também ter afectado os resultados da tensão de aderência obtidos.

O dinamómetro e o método que se utilizou são convenientes para avaliar a aderência das argamassas de reboco ao suporte em edifícios antigos. Deve, no entanto, ter-se algum cuidado com a cola utilizada e na limpeza da superfície onde vai ser fixada a “pastilha” metálica, para que o ensaio ocorra sem qualquer tipo de problema. Por ser um método semi-destrutivo, devem tomar-se as devidas precauções para proceder à reparação das superfícies afectadas (caso se queira manter o revestimento).

Relativamente aos boletins de ensaio, preencheram-se apenas boletins para dois dos cinco ensaios efectuados, pois estes têm o objectivo de servirem de exemplo para a sistematização da informação a incluir no plano de inspecção e ensaio.

O modo de preenchimento destas fichas bem como os itens apresentados permitem considerar que os modelos criados se adequam a futuros trabalhos de diagnóstico.

6.3 – OBJECTIVOS PROPOSTOS E OBJECTIVOS ALCANÇADOS

Considerando que o principal objectivo proposto para esta dissertação seria perceber o funcionamento e o tipo de utilização de alguns métodos de diagnóstico para a detecção de anomalias em edifícios antigos, através da sua aplicação numa ou em várias paredes, pode afirmar-se que esse objectivo foi alcançado. Contudo, poderiam ter-se utilizado mais equipamentos de diagnóstico, o que não foi possível. De entre os ensaios que ficaram por realizar podem salientar-se o ensaio dinâmico com acelerómetros, o ensaio com macacos planos e o ensaio de quantificação de sais solúveis com as amostras recolhidas na Parede 5 (vista v3).

6.4 – DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A concluir este trabalho referem-se alguns desenvolvimentos futuros no âmbito da inspeção e diagnóstico de edifícios antigos, nomeadamente:

- aplicação dos métodos empregues no caso de estudo a outros edifícios de forma a poder relacionar, entre si, os valores obtidos;
- utilização de dois ou mais equipamentos de inspeção e diagnóstico, que se complementem entre si, numa mesma parede, de forma a relacionar os valores obtidos e confirmar o diagnóstico;
- aplicação dos restantes métodos de inspeção e diagnóstico descritos no Capítulo 4, principalmente os não-destrutivos e semi-destrutivos.

Bibliografia

- [1] APPLETON, João – *Reabilitação de Edifícios Antigos. Patologias e Tecnologias de Intervenção* – 1ª Edição. Edições ORION, Alfragide, 2003
- [2] ARÊDE, António; COSTA, Aníbal – *Inspecção e Diagnóstico Estrutural de Construções Históricas*. Seminário "A Intervenção no Património. Práticas de Conservação e Reabilitação", FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2002
- [3] BINDA, Luigia; SAISI, Antonella; LUDWIG, Nicola; MAIERHOFER, Christiane; LEIPOLD, Sven; SCHAURICH, Dieter – *Combination of Non-Destructive Testing Methods for the Characterisation of the Moisture Content and Distribution in a Historic Brickwall*. 2nd Int. RILEM Conference on Rehabilitation of Structures – Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Melbourne, Australia, 1998
- [4] BINDA, Luigia; SAISI, Antonella – *Non Destructive Testing Applied to Historic Buildings: The Case of some Sicilian Churches*. Historical Constructions 2001, Guimarães, 2001
- [5] BINDA, Luigia; SAISI, Antonella – *State of the Art of Research on Historic Structures in Italy*. Dept. of Structural Engineering, Politecnico of Milan, Italy, 2001
- [6] BINDA, Luigia; ANZANI, Anna; SAISI, Antonella – *Preservation of the Historic Structures: Investigation and Diagnosis as Essential Steps for Compatible Choices*. ICPCM - International Conference on Performance of Construction Materials - A New Era of Building, Cairo, Egypt, 2003
- [7] BINDA, Luigia; LUALDI, Maurizio; SAISI, Antonella; ZANZI, Luigi; GIANINETTO, Marco; ROCHE, Guido – *NDT Applied to the Diagnosis of Historic Buildings: A Case History*. Structural Faults & Repair, 2003, London, United Kingdom, 2003
- [8] BINDA, Luigia; CANTINI, Lorenzo; FERNANDES, F.; SAISI, Antonella; TEDESCHI, Cristina; ZANZI, Luigi – *Diagnostic Investigation on the Historical Masonry Structures of a Castle by the Complementary Use of Non Destructive Techniques*. 13th International Brick and Block Masonry Conference, Amsterdam, The Netherlands, 2004

- [9] BINDA, Luigia; SAISI, Antonella – *Application of NDT's to the diagnosis of Historic Structures*. NDTCE'09 – Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009
- [10] BONSHOR, R. B.; BONSHOR, L. L. – *Cracking in buildings*. Construction Research Communications, London, United Kingdom, 1996
- [11] BRANCO, Miguel E. M. – *Reforço Sísmico de Edifícios de Alvenaria. Aplicação a edifícios "gaioleiros"*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007
- [12] CARDOSO, Rafaela; LOPES, Mário; BENTO, Rita – *Avaliação Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria*.
- [13] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) – *Methods of Test for Mortar for Masonry - Part 12: Determination of Adhesive Strength of Hardened Rendering and Plastering Mortars on Substrates*. EN 1015 – 12, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2000
- [14] CÓIAS, Vítor – *Inspeções e Ensaios na Reabilitação de Edifícios*. IST Press, Lisboa, 2006
- [15] COLLEPARDI, Mario; COLLEPARDI, Silvia; TROLI, Roberto – *Salt Weathering of Masonry Walls. The Venice Experience*. CANMET/ACI International Conference, Salonicco, Greece, 2003
- [16] COSTA, Aníbal – *Caracterização das Propriedades Mecânicas das Paredes de Alvenaria Tradicional das Casas da Ilha do Faial, Açores*. REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000
- [17] CRUZ, Paulo J. S.; TOPCZEWSKI, Lukasz; FERNANDES, Francisco M.; LOURENÇO, Paulo B. – *Utilização do Radar de Prospeção Geotécnica na Localização de Bainhas de Pré-Esforço nas Pontes da Barra e de Lanheses*. 4^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas, Lisboa, 2006
- [18] DIAS, Susana José Gomes – *Intervenções de Reabilitação em Património Construído – Projecto de Beneficiação do Castelo de Alter do Chão*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008
- [19] ESTÉVEZ, David Garcia – *Experimental and Numerical Analysis of Stone Masonry Walls Strengthened with Advanced Composite Materials*. Universidad Del País Basco, Bilbao, Spain, 2009

-
- [20] FERNANDES, Francisco M.; LOURENÇO, Paulo B.; ZANZI, Luigi – *Avaliação da Constituição de elementos Estruturais através do Radar de Prospeção Geotécnica*. Engenharia e Vida, nº 28, p. 38-44, 2006
- [21] FERNANDES, Francisco M.; LOURENÇO, Paulo B. – *Aplicações do georadar na reabilitação e detecção de anomalias*. Congresso Construção 2007 – 3º Congresso Nacional, Coimbra, 2007
- [22] FERREIRA, João; BRANCO, Fernando – *Aulas Práticas da Disciplina de Inspeção de Edifícios da Licenciatura em Arquitectura*. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Lisboa, 2005
- [23] FLORES – COLEN, Inês; BRITO, Jorge de; BRANCO, Fernando A. – *Avaliação in-situ da aderência de materiais de revestimento*. APFAC - 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa 2007
- [24] GREGORCZYK, Pawel; LOURENÇO, Paulo B. – *A Review on Flat-Jack Testing*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2000
- [25] GROOT, J. W. P. Caspar; GUNNEWEG, Jos – *Water Problems in Single Wythe Masonry Walls: The Case of Wind Mills*. Construction and Building Materials, The Netherlands, 2004
- [26] HENRIQUES, Fernando - *Fenómenos de Higroscopicidade devidos à Presença de Sais Solúveis*. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios. FEUP, Porto, 2003
- [27] HENRIQUES, Fernando – *Humidade em Paredes* – 4ª Edição. Colecção Edifícios. Nº1. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2007
- [28] LNEC – *Boletins de Ensaios*. Especificação E345, LNEC, Lisboa, 1984
- [29] LOURENÇO, Paulo B.; FERNANDES, Francisco M.– *Análise de Estabilidade da Igreja de São João de Tarouca. Relatório 01* – DEC/E-4, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2001
- [30] LOURENÇO, Paulo B. – *Structural Behavior of Civil Engineering Structures: Highlight in Historical and Masonry Structures*. 1st Workshop on Civil Engineering Research, Braga, 2006

- [31] MAGALHÃES, Ana Cristian; VEIGA, Maria do Rosário; COSTA, Dória – *Caracterização do Estado de Conservação dos Revestimentos de Paredes Antigas Através de Ensaios “In Situ”. Dois Casos de Estudo.*
- [32] MAIERHOFER, Christiane; ROELLIG, Mathias – *Active Thermography for the Characterization of Surfaces and Interfaces of Historic Masonry Structures.* NDTCE 09 – Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009
- [33] MASCARENHAS, Jorge – *Sistemas de Construção V – O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa: Processo Evolutivo dos Edifícios – Inovações Técnicas – Sistema Construtivo – Materiais Básicos (3ª Parte): O Vidro.* Livros Horizonte, Lisboa, 2005
- [34] MENDONÇA, Luís Viegas – *Termografia por Infravermelhos – Inspeção de Betão.* Engenharia & Vida, nº16, pp. 53-57, Lisboa, 2005
- [35] MEOLA, Carosena – *Infrared Thermography of Masonry Structures.* Infrared Physics & Technology, Volume 49, pp. 228-233, Napoli, Italy, 2007
- [36] MESQUITA, Carlos; LANÇA, Pedro – *Levantamento, Inspeção e Ensaios para Avaliação da Segurança Estrutural de Edifícios Antigos, em Ponta Delgada, Açores.* 4º CINPAR – Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação de Estruturas, Aveiro, 2008
- [37] PALAIA, Liliana; SÁNCHEZ, Rafael; LÓPEZ, Vicente; GIL, Luísa; MONFORT, José; TORMO, Santiago; NAVARRO, Pablo; ÁLVAREZ, M. Ángeles – *Procedure for NDT and Traditional Methods of Ancient Building Diagnosis , by Using Thermograph, Digital Images and other Instruments Data Analysis.* 17th World Conference on Non Destructive Testing, Shanghai, China, 2008
- [38] PINHEIRO, Daniel Silva; LOPES, Luís M. Bragança Miranda; AGUIAR, José L. Barroso – *Descolagem de um Revestimento Cerâmico em Fachada.* PATORREB 2006 – Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006
- [39] PINHO, Fernando F. S. – *Soluções Construtivas de Paredes de Edifícios Antigos em Portugal.* REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000
- [40] PINHO, Fernando F. S. – *Principais Patologias em Paredes de Edifícios Antigos.* REPAR 2000 – Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas. LNEC, Lisboa, 2000

- [41] PINHO, Fernando F. S. – *Construções em Alvenaria de Pedra Tradicional – Principais Anomalias e Técnicas de Reabilitação*. Publicação UNIC/UNL, Lisboa, 2003
- [42] PINHO, Fernando F. S.; BAIÃO, Manuel F. C.; LÚCIO, Válder J. G. – *Seismic Behaviour of Limestone Masonry Buildings*. IABSE Symposium Lisbon 2005 – International Association for Bridge and Structural Engineering, Lisboa, 2005
- [43] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes de Alvenaria Ordinária – Estudo Experimental com Modelos Simples e Reforçados*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), Lisboa, 2007
- [44] PINHO, Fernando F. S. – *Paredes de Edifícios Antigos em Portugal – 2ª Edição*. Colecção Edifícios. Nº 8. LNEC, Lisboa, 2008
- [45] PORTO, Francesca da; VALLUZZI, Maria Rosa; MODENA, Claudio – *Use of Sonic Tomography for the Diagnosis and the Control of Intervention in Historic Masonry Buildings*. International Symposium – Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003, Berlin, Germany, 2003
- [46] RAMOS, Luís; LOURENÇO, Paulo B. – *Análise das Técnicas de Construção Pombalina e Apreciação do Estado de Conservação Estrutural do Martinho da Arcada*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2000
- [47] ROQUE, João – *Reabilitação Estrutural de Paredes Antigas de Alvenaria*. Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, 2002
- [48] SAISI, Antonella; VALLE, Stephano; ZANZI, Luigi; BINDA, Luigia – *Radar and Sonic as Complementary and/or Alternative Tests in the Survey of Structures*. UNESCO ICOMOS Congress: More than Two Thousand Years in the History of Architecture Safeguarding the Structure of our Architectural Heritage, Paris, France, 2001
- [49] UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA (UNL) / DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL (DEC) – *Pedras Naturais e Artificiais. Análise Semi-Quantitativa de Sais Solúveis*. Fe 09, UNL/FCT, Monte de Caparica, 1996
- [50] UNL/DEC – *Pedras Naturais e Artificiais. Determinação da Higroscopicidade*. Fe 04, UNL/FCT, Monte de Caparica, 1996

- [51] UNL/DEC – *Pedras Naturais e Artificiais. Determinação do Teor de Água*. Fe 03, UNL/FCT, Monte de Caparica, 1996
- [52] UNL/DEC – *Pedras Naturais e Artificiais. Velocidade de Propagação do Som*. Fe 13, UNL/FCT, Monte de Caparica, 1996
- [53] VALLUZI, Maria Rosa; PORTO, Francesca da; MODENA, Claudio – *Structural Investigations and Strengthening of the Civic Tower in Vincenza*. 10th International Conference Structural Faults + Repair, London, United Kingdom, 2003
- [54] VALLUZZI, Maria Rosa; MAZZON, N.; MUNARI, M.; CASARIN, F.; MODENA, Cláudio – *Effectiveness of injections evaluated by sonic tests on reduced scale multi-leaf masonry building subjected to seismic actions*. NDTCE'09 – Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009
- [55] VEIGA, M. Rosário – *Argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos. Características e campo de aplicação de algumas formulações correntes*. 3º ENCORE – Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. LNEC, Lisboa, 2003
- [56] Website: <http://www.mundoceys.com>, 2/06/09
- [57] Website: <http://www.connexiontechnology.co.uk/data10.html>, 3/06/09
- [58] Website: <http://www.flir.com>, 5/07/09
- [59] Website: http://pt.wikipedia.org/wiki/Relação_constitutiva, 25/07/09
- [60] Website: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Simbiose>, 17/08/09

Anexo I

Boletim de Ensaio Modelo

Edifício: _____

Localização: _____

Data de início do ensaio: ____ / ____ / ____ Data de fim do ensaio: ____ / ____ / ____

Identificação do elemento de ensaio:*

--

*PARA A IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE ENSAIO DEVEM SER ANEXADAS AOS BOLETINS PLANTAS, ALÇADOS OU CORTES DO EDIFÍCIO

Caracterização do elemento de ensaio:

	(IMAGEM DO ELEMENTO EM ESTUDO)
--	--------------------------------

Anomalias observadas:

--

Método de ensaio:

--

Condições do ensaio:

--

Material utilizado no ensaio:

--

Procedimento utilizado no ensaio:

--

Resultados do ensaio:

--

/ /

(técnico responsável pela realização do ensaio)

Anexo II

Boletim de Ensaio de Determinação do Teor de Humidade de uma Parede

Edifício: *Palacete Lusitânia*

Localização: *A fachada nascente está situada na Rua de São Domingos à Lapa, nº27, e a fachada sul na Rua do Prior, nº 2, em Lisboa*

Data de início do ensaio: *26 / 05 / 09*

Data de fim do ensaio: *28 / 05 / 09*

Identificação do elemento de ensaio: *

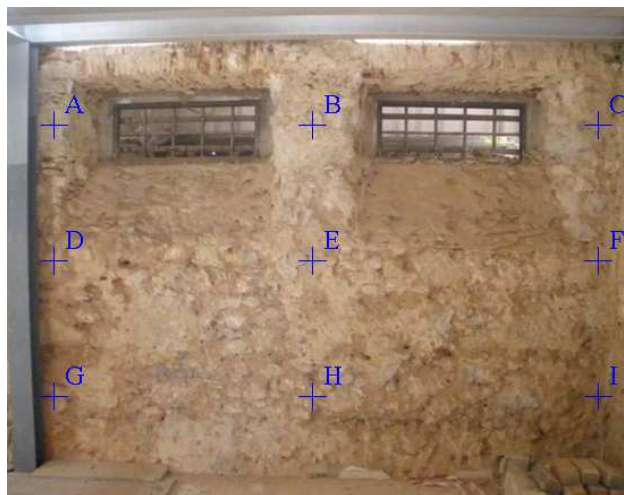
** este campo não foi preenchido pois não se incluíram plantas, alçados ou cortes*

Caracterização do elemento de ensaio:

Constituição: parede exterior de alvenaria ordinária

Espessura: 0,75 m

Reboco: previamente removido



Anomalias observadas:

Parede húmida ao tacto

Método de ensaio:

Ensaio de determinação do teor de humidade

Condições do ensaio:

- *Temperatura no interior do compartimento de 20,5°C*
- *Humidade relativa no interior do compartimento de 78%*

Material utilizado no ensaio:

(i) frascos de plástico de 50 ml com uma tampa hermética e outra rosçada; (ii) "geleira"; (iii) berbequim de baixa rotação com bitola e brocas de 200 mm de comprimento e 8 mm de diâmetro; (iv) termo-higrómetro; (v) giz, régua metálica de 1m, fita métrica de 3 m e fio-de-prumo; (vi) balança com precisão de 0,001 g; (vii) estufa ventilada; (viii) caixas de "Petri".

Procedimento utilizado no ensaio:

(i) numeraram-se os frascos e as caixas de "Petri", procedendo de seguida à pesagem das mesmas; (ii) registou-se a temperatura e humidade relativa do interior do compartimento da parede, pela colocação do termo-higrómetro no dia anterior, para estabilizar; (iii) marcaram-se as cotas onde iriam ser executados os furos, com o auxílio do fio-de-prumo, fita métrica e da régua metálica; (iv) efectuou-se um furo à profundidade de 10 cm, com o berbequim a baixa rotação, e recolheu-se a amostra, colocando o frasco por baixo. Executou-se o segundo furo ao lado do primeiro, a cerca de 20 cm de profundidade, recolhendo-se a amostra do mesmo modo. Foi utilizado o mesmo procedimento para os restantes furos; (v) depois de recolhidas todas as amostras, estas foram acondicionadas no saco térmico para melhor preservação até à sua pesagem; (vi) agitou-se o primeiro frasco que continha a primeira amostra, despejou-se o seu conteúdo para a caixa de "Petri", procedendo de imediato à sua pesagem e registo do valor. Foi efectuado o mesmo procedimento para as restantes amostras; (vii) seguidamente, colocaram-se as amostras na estufa a 105 C° durante 1 hora; (viii) ao fim de 1 hora, retiraram-se as amostras da estufa e procedeu-se à sua pesagem, uma a uma, registando o seu valor.

Resultados do ensaio:

<i>Amostra</i>	<i>Profundidade (cm)</i>	<i>Teor de humidade (%)</i>
<i>A</i>	<i>10 cm</i>	<i>2,95</i>
<i>B</i>		<i>5,26</i>
<i>C</i>		<i>2,39</i>
<i>D</i>		<i>1,35</i>
<i>E</i>		<i>1,22</i>
<i>F</i>		<i>2,43</i>
<i>G</i>		<i>2,32</i>
<i>H</i>		<i>3,00</i>
<i>I</i>		<i>7,05</i>

<i>Amostra</i>	<i>Profundidade (cm)</i>	<i>Teor de humidade (%)</i>
<i>A</i>	<i>20 cm</i>	<i>1,93</i>
<i>B</i>		<i>2,72</i>
<i>C</i>		<i>5,43</i>
<i>D</i>		<i>5,45</i>
<i>E</i>		<i>1,02</i>
<i>F</i>		<i>4,31</i>
<i>G</i>		<i>1,49</i>
<i>H</i>		<i>3,57</i>
<i>I</i>		<i>1,03</i>

28 / 05 / 09

António Maria Oliveira Coelho Palma
(técnico responsável pela realização do ensaio)

Anexo III

Boletim de Ensaio de Termografia

Edifício: *Palacete Lusitânia*

Localização: *A fachada nascente está situada na Rua de São Domingos à Lapa, nº27, e a fachada sul na Rua do Prior, nº2, em Lisboa*

Data de início do ensaio: *06 / 07 / 09* Data de fim do ensaio: *06 / 07 / 09*

Identificação do elemento de ensaio: *

** este campo não foi preenchido pois não se incluíram plantas, alçados ou cortes*

Caracterização do elemento de ensaio:

Constituição: parede exterior de alvenaria ordinária

Espessura: 0,65 m

Reboco: previamente removido



Anomalias observadas:

A parede encontra-se em bom estado de conservação, sem anomalias aparentes

Método de ensaio:

Ensaio de termografia

Condições do ensaio:

- *Humedecimento manual da parede*
- *Termografia passiva (sem iluminação artificial)*

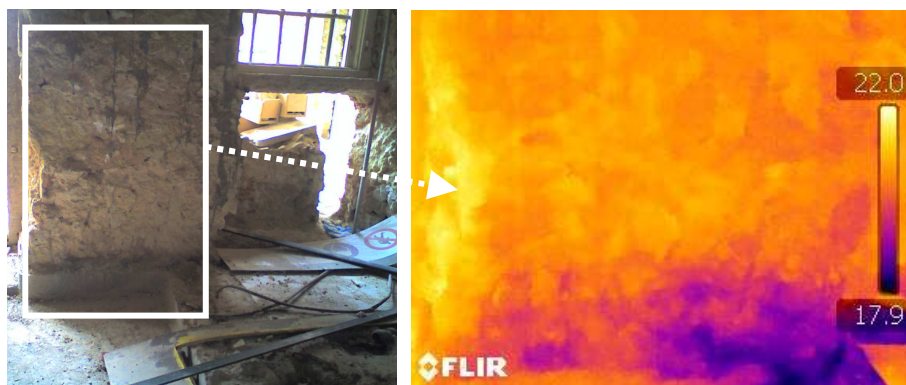
Material utilizado no ensaio:

Câmara termográfica da marca FLIR, modelo T360

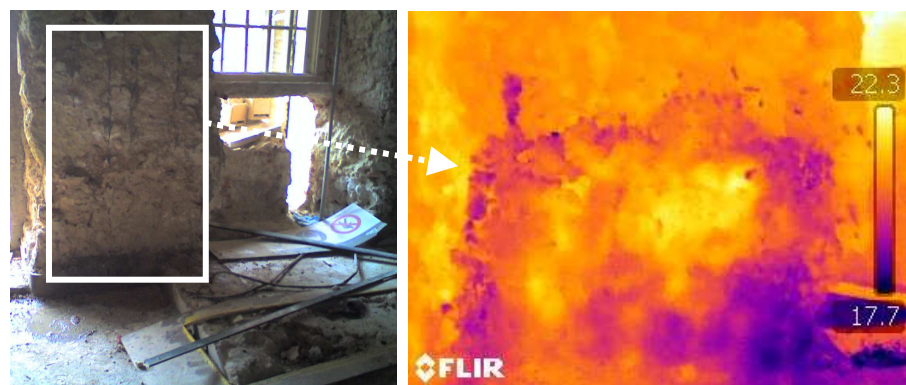
Procedimento utilizado no ensaio:

- (i) observou-se a Parede 1 com a câmara termográfica antes de proceder ao seu humedecimento;*
- (ii) molhou-se a Parede 1 com a esponja até cerca de 1 m de altura e observou-se com a câmara termográfica imediatamente após o seu humedecimento;*
- (iii) observou-se a Parede 1 com a câmara termográfica 10 minutos após o humedecimento.*

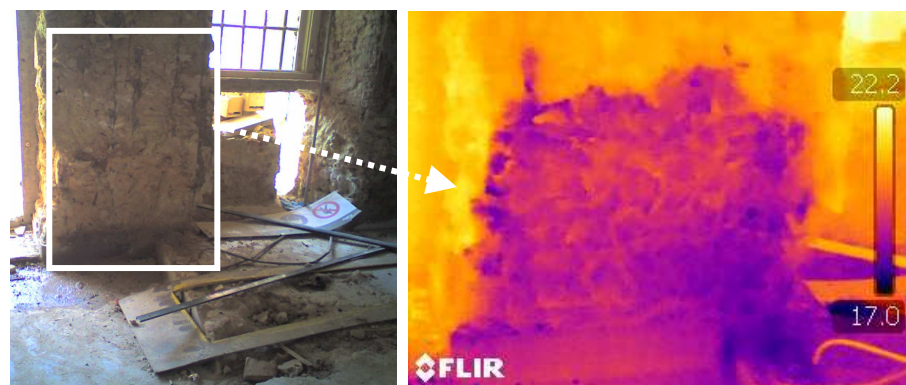
Resultados do ensaio:



Antes do humedecimento da parede



Imediatamente após o humedecimento da parede



10 minutos após o humedecimento da parede

06 / 07 / 09

António Maria Oliveira Coelho Palma
(técnico responsável pela realização do ensaio)

